INVESTIGACIÓN Y CIENCIA | UNA CRISIS CÓSMICA | MODELOS EPIDEMIOLÓGICOS DE LA COVID-19 | RIESGOS DEL IMPULSO GÉNICO | N.º 524 | MAYO 2020

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Mayo 2020 • N.º 524 • 6,90 € • investigacionyciencia.es

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

UNA CRISIS CÓSMICA

Las discrepancias en las medidas de la velocidad de expansión del universo abren el debate sobre una nueva física

COVID-19

Modelos matemáticos para frenar la pandemia

BIOTECNOLOGÍA

Promesas y riesgos del impulso génico

ECOLOGÍA

¿Qué está matando a la mariposa monarca?



INVESTIGACIÓN Y
CIENCIA
Mayo 2020, Número 524

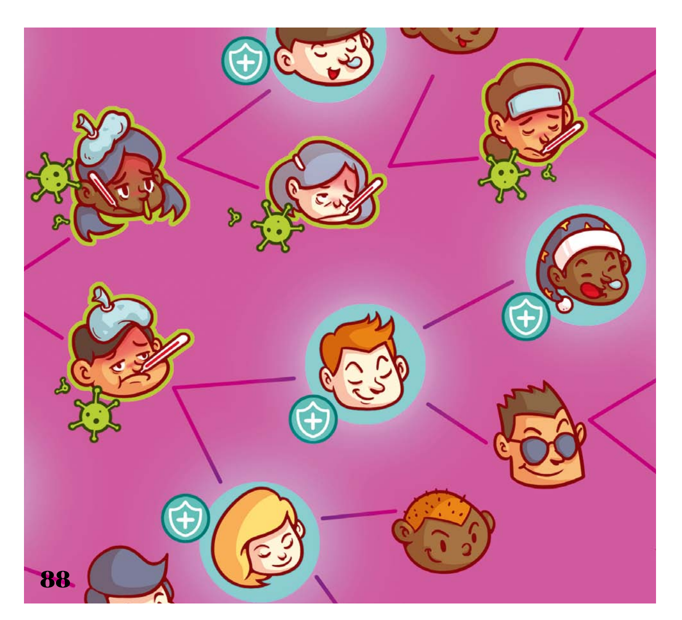


INGO ARNDT, NATURE PICTURE LIBRARY

ARTÍCULOS



47



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA



La constante de Hubble, que indica el ritmo actual de expansión del universo, es una cantidad crucial en cosmología. Pero su valor dista de estar claro: las observaciones del universo temprano (inmediatamente posterior a la gran explosión) y del universo reciente arrojan valores diferentes e incompatibles. Esta discrepancia podría deberse a fenómenos físicos aún desconocidos. Ilustración de Mark Ross Studios.

redaccion@investigacionyciencia.es



Febrero 2020

EL ATOLLADERO DE LA FÍSICA FUNDAMENTAL

Decir que la física se encuentra actualmente inmersa en un atolladero descomunal no es nada nuevo y puede que hasta se quede corto. Prueba de ello es el número de febrero de 2020 de Investigación y Ciencia, donde, en apenas una docena de páginas, dos autores proponen soluciones a problemas conceptuales que cuestionarían algunos de sus más «sagrados» fundamentos.

En «Una nueva explicación para la energía oscura», el físico teórico Daniel E. Sudarsky propone la gravedad unimodular para resolver el problema de la constante cosmológica y explicar la energía oscura. Una solución que, sin embargo, parece implicar una sutil violación de la ley de conservación de la energía.

Por su parte, en el artículo «Cómo fugarse de un agujero negro», el también físico teórico Steven B. Giddings considera la posibilidad de velocidades superlumínicas para resolver el problema de la información en los agujeros negros, lo que supondría una violación del principio de localidad. En un arranque de sinceridad, el autor admite: «[Todo esto] parece una locura, pero aún no hemos encontrado ninguna alternativa que no lo parezca».

Ante el desconcierto que supone llevar ya varias décadas de frustraciones acumuladas en la búsqueda de respuestas para unificar la mecánica cuántica y la gravedad, parece que se impone ya sin complejos la idea de que para afrontar esta crisis será indispensable un nuevo y radical cambio de paradigma. Al respecto, recuerdo una perturbadora reflexión del físico y divulgador Michio Kaku, quien pensaba que estas ansiadas respuestas podrían estar fuera del alcance de nuestras capacidades mentales, del mismo modo que un chimpancé nunca podrá comprender la teoría de la relatividad. Lo que en su momento me pareció una *boutade* va camino de convertirse en una seria posibilidad.

Miguel Ángel Lapeña
La Alberca, Murcia

SOBRE LAS POSIBILIDADES DEL ALBA Y LA LUZ DE SINCROTRÓN

En «ALBA: Luz de sincrotrón para investigar la materia» [Investigación y Ciencia, febrero de 2020], Caterina Biscari, Ana Belén Martínez, Gastón García y Ramón Pascual explican el funcionamiento del sincrotrón ALBA y cómo la radiación generada en estas instalaciones puede emplearse a modo de «microscopio» para investigar las propiedades de todo tipo de materiales y muestras biológicas. Al respecto, me gustaría hacer las siguientes preguntas.

Al incidir sobre la superficie de un material, ¿puede la radiación de sincrotrón usarse para producir alguna modificación aprovechable de su estructura atómica o molecular, más allá del estudio de las muestras?

En los aceleradores donde se hacen chocar electrones y positrones se generan, además, rayos gamma. ¿Podría aprovecharse esta radiación (de menor longitud de onda que los rayos X) para estudiar la materia a escalas aún más pequeñas?

> Parece que se impone ya sin complejos la idea de que para afrontar esta crisis [de la física] será indispensable un nuevo y radical cambio de paradigma
> —Miguel Ángel Lapeña (La Alberca, Murcia)

Por último, ¿podrán las instalaciones de ALBA II trabajar a una energía mayor que los 3 GeV actuales?

Juan Torras Suriol
Terrassa

Responden los autores: *La respuesta a la primera pregunta es que, en general, la luz de sincrotrón sirve para caracterizar y observar los efectos de agentes externos sobre las muestras, no para modificarlas. No obstante, existen excepciones, como por ejemplo el uso que se hace en técnicas litográficas y de microfabricación, o algunas de las aplicaciones terapéuticas que se llevan a cabo en algunos sincrotrones.*

En cuanto a la segunda pregunta, en los colisionadores donde se hacen chocar electrones y positrones se producen rayos gamma y otros muchos productos en función de la energía de la colisión. Pero los rayos gamma —que, en efecto, sí se utilizan para estudiar la materia a escalas aún menores— pueden también obtenerse de maneras más sencillas, como a partir de isótopos radiactivos.

Con respecto a la última cuestión, lo que se persigue con ALBA II no es aumentar la energía de los electrones, sino producir haces de fotones más intensos (técnicamente, de menor emitancia) a partir de un cambio en la estructura de los imanes de curvatura del anillo.

Erratum corrige

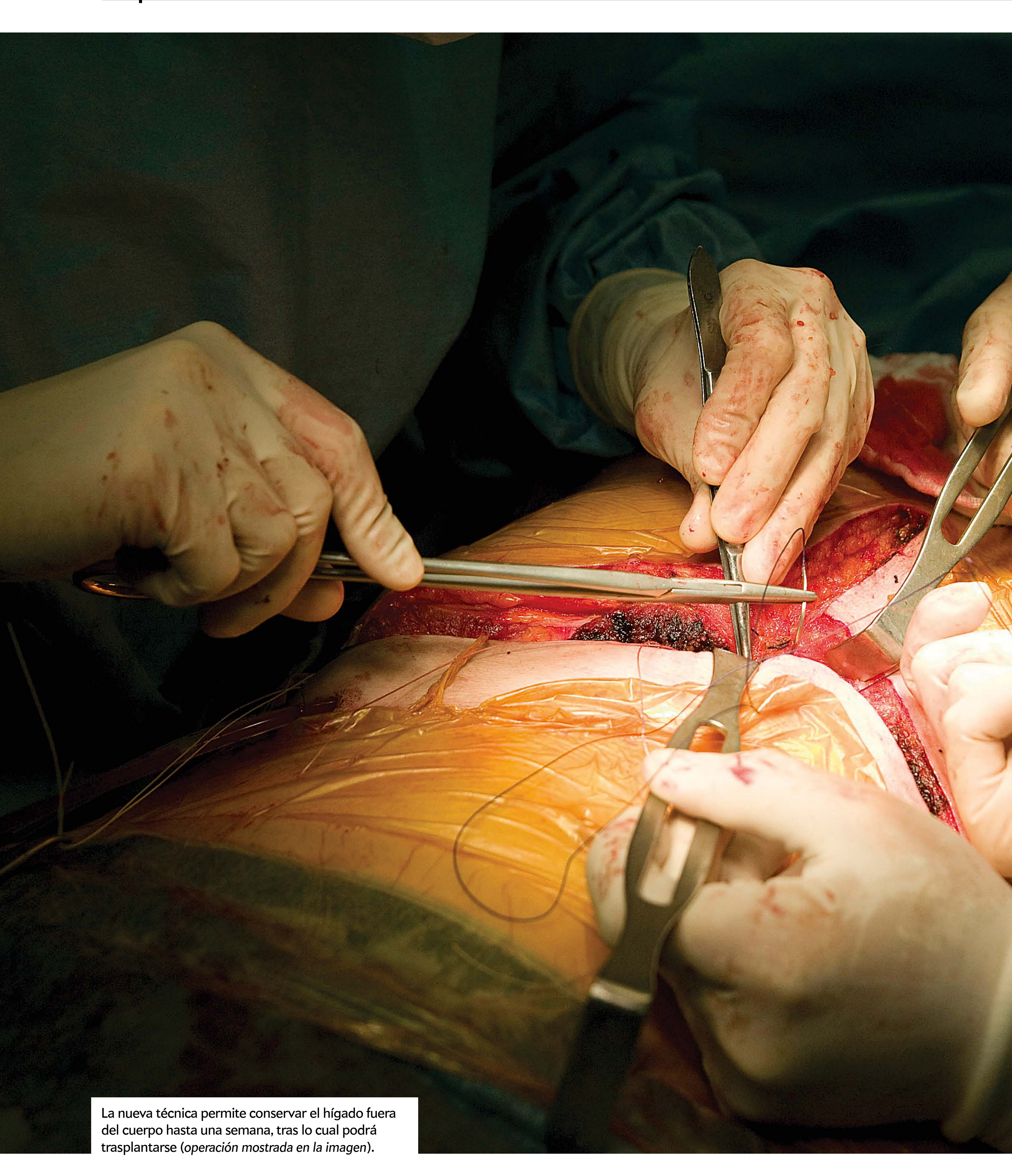
En el artículo **El coronavirus más mediático** [por Ignacio López-Goñi; Investigación y Ciencia, abril de 2020], al final de la segunda columna de la página 13 se hace referencia al ADN del virus, cuando debe ser el ARN.

Este error ha sido corregido en la edición digital del artículo.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S. A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.



La nueva técnica permite conservar el hígado fuera del cuerpo hasta una semana, tras lo cual podrá trasplantarse (*operación mostrada en la imagen*).





GETTY IMAGES

TECNOLOGÍA MÉDICA

Soporte vital para órganos

Una nueva máquina conserva durante una semana el hígado extirpado

Numerosas personas fallecen cada año en todo el mundo mientras esperan un trasplante de hígado, en parte porque los métodos de conservación solo mantienen vivo este órgano unas 24 horas. (En España, en 2018 había más de 1800 pacientes que esperaban un trasplante hepático). Ahora, en un hito de la ingeniería médica, se ha ideado una máquina que mantiene el hígado en buen estado hasta una semana o más. La técnica supone un gran avance en la conservación de órganos, aunque aún no se ha aplicado en ningún trasplante.

Muchos hígados no son aptos para el trasplante porque son demasiado viejos, contienen demasiada grasa o han quedado dañados (por un paro cardíaco, por ejemplo). Los creadores del nuevo aparato afirman que mantiene vivo el hígado durante el tiempo suficiente para que este se regenere —una capacidad natural que muestra este órgano hasta cierto punto— y permite que los médicos valoren mejor su estado. «Decidimos estudiar el hígado durante una semana porque es el período necesario de regeneración» en los pacientes a quienes se les ha extirpado una parte, afirma Pierre-Alain Clavien, jefe de cirugía y de trasplantes en el Hospital Universitario de Zúrich y uno de los autores del artículo que describe la investigación. Asegura que esta técnica de conservación beneficiará sobre todo a ciertos pacientes con cáncer hepático, ya que permitirá conservar partes indemnes del hígado para su reimplantación posterior y eludir así los problemas del rechazo de los tejidos.

El método actual de conservación consiste en irrigar el hígado extirpado con una solución fría y después colocarlo en hielo, donde mantiene su viabilidad entre 12 y 18 horas. Hace poco se ha elaborado un método para enfriarlo, sin llegar a la congelación, que amplía el plazo hasta las 27 horas. Aun así, no basta para que se autorrepare si está dañado, explica Clavien.

La nueva máquina gana un tiempo crucial al imitar atributos clave de nuestro organismo. Bombea sangre con una presión y un contenido de oxígeno rigurosamente controlados, en un proceso llamado perfusión. Suministra una solución glucosada que aporta energía a los eritrocitos que circulan por el hígado y también inyecta insulina y glucagón, las hormonas encargadas de controlar la concentración de glucosa. Con un dializador se eliminan los desechos y se mantiene el equilibrio electrolítico. Y, por último, un globo hinchable situado debajo del órgano simula el movimiento del diafragma durante la respiración, que impide el daño que la presión constante causaría en los tejidos hepáticos.

> «Desde el punto de vista clínico, mantener vivo un hígado solo unas horas más ya resultará útil»
>
> —Korkut Uygun, *Facultad de Medicina de Harvard*

El aparato ha sido refinado y puesto a prueba con hígados porcinos, antes de pasar a los humanos. Se han podido conservar ocho hígados de cerdo en buen estado durante una semana, de los cuales tres se trasplantaron con éxito a cerdos vivos, que sobrevivieron. Después del trasplante, los hígados perfundidos mostraron niveles de daño equiparables a los de los cinco que habían permanecido algunas horas en hielo antes de ser trasplantados.

A continuación, el equipo sometió a prueba la máquina con 10 hígados humanos que varios centros de trasplante europeos habían rechazado por su mal estado. El daño hepático se valora mediante el aumento de ciertas proteínas englobadas en la denominación «patrones moleculares asociados a daño» (DAMP, por sus siglas en inglés); tras su paso por la máquina, seis de los diez hígados del experimento mostraron un descenso en las DAMP y en otros signos de deterioro. «Ahora podremos destinar al trasplante algunos hígados dañados sin poner en riesgo a los receptores», asegura Clavien. Él y sus colaboradores describieron su trabajo el pasado enero en *Nature Biotechnology*.

«Es un estudio de factura impecable», asegura Korkut Uygun, cirujano y bioingeniero en la Escuela de Medicina de Harvard que no ha participado en la investigación. En su opinión, el principal inconveniente del estudio estriba en que solo el 60 por ciento de los órganos permanecieron estables al cabo de una semana en la máquina; si fueran hígados sanos, «un índice de fracaso del 40 por ciento no sería aceptable en el ámbito de los trasplantes». Tampoco le convence que la máquina propicie la regeneración del hígado, frente a la mera conservación. «La regeneración es compleja. Las posibilidades son increíbles, pero necesitamos más tiempo para verificarlo.»

PARASITOLOGÍA

Parásitos en el cerebro

Invasores de los embriones de lagartija

Cuando Nathalie Feiner descubrió un diminuto nematodo en el cerebro de un embrión de lagartija roquera (*Podarcis muralis*) procedente de los Pirineos franceses, pensó que era un hecho fortuito. Como parte de un estudio había diseccionado cientos de embriones de lagartija sin haber encontrado nunca un intruso así, pero no tardaron en aparecer otros en el cerebro de otros reptiles nonatos.

Intrigada, Feiner, entonces en la Universidad de Oxford, y un colaborador suyo examinaron a los progenitores. Así descubrieron nematodos en los ovarios de las hembras que habían engendrado a los embriones infestados, lo cual llevaba a pensar que los parásitos estaban migrando a la descendencia, algo que se consideraba imposible.

Los parásitos que, como estos nematodos, no se multiplican en el hospedador suelen transmitirse, en los mamíferos, de la hembra a la cría a través de la placenta o de la leche materna. Pero hasta ahora se había creído que en las aves y los reptiles, la cáscara que envuelve el embrión en desarrollo actuaba como una barrera contra tales invasores. Nunca se había observado la infestación a través de un huevo de reptil, asegura Feiner. «Parece que hemos topado con una estrategia radicalmente nueva, propia de esos nematodos.»

En un artículo publicado en *American Naturalist* el pasado marzo, Feiner y sus colaboradores relatan cómo examinaron 720 huevos de 85 hembras de lagartija roquera halladas en seis localidades. Solo descubrieron nematodos en ejemplares procedentes de la primera



Embrión de lagartija roquera.

NATHALIE FEINER, UNIVERSIDAD LUND

población pirenaica. Las hembras infestadas transmitían el parásito a entre el 50 y el 76,9 por ciento de los embriones.

El análisis de ADN indica que son similares a otra especie de nematodo alojada en el intestino del reptil, pero mucho más pequeño; se cree que podrían haber evolucionado a partir de esta última.

Feiner afirma que la transmisión a través del huevo podría haber pasado inadvertida porque básicamente se han examinado los

Según Stefan Schneeberger, jefe de cirugía y trasplante hepatobiliar en la Universidad de Medicina de Innsbruck, la trascendencia de los nuevos hallazgos se resume en una palabra: tiempo. «Es el primer ejemplo de una técnica que conserva un órgano durante una semana. Supone todo un hito», opina Schneeberger, que no ha participado en el estudio. Afirma que no existen muchas pruebas de que la máquina mejore la calidad de los órganos y que la «regeneración» real probablemente quede lejos todavía, aunque sigue siendo el objetivo final.

Si bien los resultados son esperanzadores, sus creadores aún no han demostrado que los hígados conservados mantengan su funcionalidad durante mucho tiempo. El paso siguiente consiste en realizar experimentos de supervivencia del trasplante en animales de gran talla, según Schneeberger. Si culminan con éxito, la cantidad de hígados aptos para el trasplante aumentará para los pacientes de baja prioridad en las listas de espera, cosa que, según Clavien, podría suceder este mismo año. Añade que en teoría en el futuro la nueva máquina podría servir para conservar otros órganos, como el corazón o los riñones.

—*Tanya Lewis*

parásitos de las aves y las tortugas, cuya cáscara se forma poco después de la fecundación, cuando el embrión es apenas una pequeña masa de células y resulta demasiado pequeño para albergar un parásito. En cambio, en los lagartos y las serpientes la cáscara se forma más adelante, cuando el embrión ha crecido más, lo cual facilita la parasitación. James Harris, del Centro de Investigación de Biodiversidad y Recursos Genéticos (CIBIO), en Portugal, ajeno al trabajo, afirma que esta forma de transmisión podría estar muy extendida si la hipótesis del equipo es cierta.

Feiner sospecha que el nematodo modifica el comportamiento del hospedador, una argucia que los parásitos cerebrales suelen emplear para infestar a los depredadores del animal. Por ejemplo, los ratones infestados por *Toxoplasma* no rehúyen tanto la orina de gato y esto facilita que caigan presa del felino, de modo que el parásito pasa a la etapa siguiente de su ciclo de vida. «Confirmar la presencia del nematodo en un depredador de la lagartija roquera reforzaría nuestra hipótesis», concluye Feiner.

—*Sandrine Ceurstemont*



Las olas gigantes entrañan un grave peligro para cualquier barco.

JOHN LUND, GETTY IMAGES

OCEANOGRAFÍA

Predicción de olas gigantes

Diseñan un método que describe la formación de olas extremas

En mitad del océano pueden alzarse de repente olas monstruosas, varias veces más altas que las crestas circundantes, que en ocasiones alcanzan los 30 metros de altura y suponen una grave amenaza hasta para las embarcaciones más grandes. A diferencia de los tsunamis, que suelen producirse tras un gran terremoto submarino, el origen de estas olas gigantes no está claro, y hasta ahora tampoco ha sido posible predecirlas. Entender cómo se forman resulta clave para prever dónde y cuándo podrían surgir.

Un grupo de físicos matemáticos formado por Eric Vanden-Eijnden (de la Universidad de Nueva York), Giovanni Dematteis y Miguel Onorato (de la Universidad de Turín) y Tobias Grafke (de la Universidad de Warwick) ha propuesto un nuevo método para predecir olas gigantes y lo ha puesto a prueba en experimentos con un enorme tanque de agua. Su idea se basa en la teoría matemática de las grandes desviaciones, que cuantifica la incidencia de eventos raros. El equipo describió las olas extremas por medio de entidades estadísticas denominadas «instantones», ondas que aparecen en física de partículas y que también se aplican a la teoría de la información o la gestión de riesgos.

Para refinar su modelo, descrito el pasado diciembre en la revista *Physical Review X*, los científicos reprodujeron las condiciones del mar encrespado en un tanque de agua de 270 metros de largo, situado en Noruega. El mecanismo del tanque generaba olas con características particulares definidas por los investigadores; haciendo chocar diversas ondas, identificaron las señales precursoras que producían olas hasta cinco veces más altas que las circundantes.

La teoría de las grandes desviaciones también sugiere que cualquier combinación de ondas que conduzca a un cambio considerable de altura creará una gran ola con una forma característica, que no depende de las condiciones iniciales (matemáticamente, la formación de la ola sigue la ruta más probable que conduce a la ocurrencia de un evento raro). Las mediciones en el tanque demostraron que eso se cumple: «Todas las olas gigantes se parecen», confirma Vanden-Eijnden, «mientras que cada ola normal es normal a su manera».

El modelo «parece conciliar las dos principales teorías que tratan de explicar la formación de olas grandes y gigantes», señala Alvise Benetazzo, investigador del Instituto de Ciencias Marinas de Italia que no participó en el estudio. Una teoría postula que surgen simplemente a partir de la combinación y acumulación de olas más pequeñas; la otra sugiere que se producen variaciones en la forma de las olas que amplifican exponencialmente las diferencias de altura. Ninguna de estas explicaciones acababa de ajustarse a las observaciones y experimentos anteriores.

Pero los nuevos cálculos incluyen ambos efectos, que contribuyen en diferente medida en función del estado del agua, y sirven para estimar la probabilidad de que se forme una ola gigante y su altura a partir de cualquier conjunto de condiciones oceánicas. El equipo es optimista y piensa que su modelo (una vez adaptado a los océanos reales, con sus vientos, corrientes y movimientos en cualquier dirección) podría integrarse en un sistema de predicción a bordo de barcos, torres y plataformas.

«Aún hay que llevar a cabo muchos experimentos, en especial sobre el terreno», concluye Benetazzo. «Ese es el verdadero escenario donde aspiramos a explicar la formación de las olas gigantes.»

—*Rachel Berkowitz*

INGENIERÍA AERONÁUTICA

Cargas para evitar descargas

Cargar eléctricamente los aviones podría reducir las probabilidades de que los alcance un rayo



Si en mitad de un vuelo oímos un gran estruendo o vislumbramos un destello al otro lado de la ventanilla, puede que el avión haya sido alcanzado por un rayo. Cuando eso ocurre, los pilotos deben aterrizar cuanto antes para que revisen el aparato en busca de posibles daños en el revestimiento, el fuselaje o la electrónica. Aunque este protocolo resulta primordial para la seguridad, puede acarrear costosos retrasos y cancelaciones. Algunas pruebas recientes muestran que, paradójicamente, la mejor manera de prevenir el impacto de un rayo podría ser cargar eléctricamente el exterior del avión.

Durante el vuelo, pueden acumularse iones positivos y negativos sobre la superficie de la aeronave, especialmente en partes puntiagudas como el morro, los estabilizadores de la cola y los extremos de las alas. Si se genera una gran diferencia de carga, o polarización, sobre el avión antes de que este se interne en una región cargada de la atmósfera, los iones pueden circular a lo largo de la aeronave y cerrar un circuito eléctrico con las nubes, provocando una potente descarga: un relámpago. Las simulaciones por ordenador realizadas en 2018 por Carmen Guerra García, ingeniera aeroespacial del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), y Colin Pavan, estudiante de doctorado en su laboratorio, revelaron una posible solución a la acumulación de iones: añadir carga negativa al avión.

El año pasado, Guerra y Pavan (junto a otros investigadores del MIT y de la Universidad Politécnica de Cataluña) usaron un avión a escala y un generador de campos eléctricos de 10 metros de altura para medir cómo se acumulaban y disipaban las cargas en distintas condiciones. Los datos, publicados en enero en la revista *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, confirmaron que los flujos de iones a lo largo del aparato (lo que se conoce como «líderes») desencadenaban los rayos y que cargar negativamente el avión ayudaba a evitarlos. El equipo investiga cómo reducir la polarización con dispositivos que suministren iones a la superficie del avión.

«Electrificar un avión parece una locura, pero añadir carga negativa para prevenir la acumulación de carga positiva podría impedir que se forme un líder», explica Pavlo Kochkin, ingeniero aeroespacial de la Universidad de Bergen. Kochkin no participó en el proyecto, pero lleva a cabo investigaciones en las que registra los impactos de rayos durante los vuelos de prueba de los aviones nuevos. Inspirado por los resultados del MIT, está desarrollando un simulador de nubes de tormenta capaz de generar distintos niveles de aire y vapor de agua cargados eléctricamente. Con un avión a escala, podría poner a prueba el efecto protector de los emisores de iones.

—Mark Fischetti

ECOLOGÍA

Deltas en ascenso

A escala mundial, los deltas fluviales ganan terreno, de momento

Hace siglos que los deltas del planeta acogen puertos y humedales de gran importancia para la actividad humana. Pese al ascenso del nivel del mar, la extensión de estos enclaves económicos y ecológicos de primer orden no ha cesado de crecer durante las últimas décadas, una tendencia que probablemente no durará. El geocientífico Jaap Nienhuis, de la Universidad de Utrecht, y sus colaboradores han estudiado casi 11.000 deltas fluviales con la ayuda de datos captados por satélite y de estudios de campo procedentes de todo el mundo. Con simulaciones informáticas han calculado de qué modo las mareas, el oleaje y la actividad humana río arriba han alterado la forma y la extensión de cada delta de 1985 a 2015.

La deforestación que afecta a numerosas cuencas fluviales que desembocan en la costa oriental de Sudamérica y en el este, sur y sudeste de Asia ha incrementado el volumen de sedimentos arrastrados por los ríos, con el consiguiente crecimiento de los deltas. (Un ejemplo es el delta del Ganges, visible en la fotografía.) En cambio, en Norteamérica y en numerosas regiones de Europa los embalses han mermado el aporte de sedimentos con el que se renuevan muchos deltas.

Si bien el nivel del mar ha aumentado en torno a 10 centímetros durante el período estudiado, en conjunto los deltas han ido ganando cada año unos 54 kilómetros cuadrados de extensión, según comunicaron los autores en enero en *Nature*. Advierten, empero, de que el crecimiento probablemente dure poco. Molly Keogh, ecóloga de humedales en la Universidad Tulane, coincide con ellos; señala que las previsiones sitúan el alza del nivel del mar en unos 60 centímetros a finales del siglo XXI. Es más, los sedimentos deltaicos experimentan una notable compactación con el tiempo, bajo su propio peso.

Ese impacto doble provocará un retroceso generalizado de los deltas del planeta en las décadas venideras. Aparte de la pérdida de las infraestructuras costeras y pesqueras, otras consecuencias serán la inundación de grandes núcleos de población y de regiones agrícolas.

—Sid Perkins



El delta del río Ganges.

+ Información en nuestra web: **https://bit.ly/3bfO8Dw**

GETTY IMAGES/GUVENDEMIR/ISTOCK (*avión*); GETTY IMAGES (*delta*)

BIOLOGÍA

¿Huele a enemigo?

Las hormigas no atacan si no reconocen con certeza el aroma de sus enemigos

Identificar a las compañeras del propio bando es una cuestión de vida o muerte para una hormiga: tomar a una intrusa por compañera, o viceversa, puede desatar una confusión fatal.

Hace tiempo que sabemos que las hormigas que se mueven con soltura entre una multitud de ellas solo atacan a las que pueden ser hostiles. Nuevas investigaciones señalan a los receptores olfativos ubicados en las antenas como la clave de esa violencia selectiva: sin ellos, la hormiga queda «cegada» y deja de atacar.

«Se da por hecho que la agresión en las hormigas se rige por una regla sencilla: si un individuo huele algo que no le recuerde a su colonia natal, atacará», explica Laurence Zwiebel, uno de los autores del nuevo estudio y biólogo en la Universidad Vanderbilt. Pero el trabajo demuestra que no es tan sencillo. Las hormigas no atacan si no huelen nada, o incluso si no reconocen el rastro. «Para que ataquen han de identificar una señal precisa en las hormigas de otro hormiguero», aclara Zwiebel.

Él y sus colaboradores se basan en estudios precedentes que descubrieron una mezcla de olores sobre el exoesqueleto de estos insectos, así como receptores olfativos encargados de su captación. En el nuevo estudio se ha comprobado que cuando los receptores están alterados, la hormiga no diferencia a las compañeras de las intrusas, con las que normalmente lucharía; en lugar de ello, permanece pasiva. Las conclusiones se publicaron en enero en el *Journal of Experimental Biology*.

Los autores construyeron primero un cuadrilátero en miniatura, una placa con separadores de plástico. Después manipularon los receptores olfativos de unas hormigas carpinteras de Florida del mismo hormiguero y de otros vecinos: los bloquearon o los sobreestimularon químicamente. Cuando las colocaron en la palestra y alzaron los separadores, las hormigas con los receptores alterados no reaccionaron ante las intrusas. «El estudio demuestra que tanto la ausencia del olor como la presencia de un olor confuso inhiben la reacción agresiva», explica Zwiebel.

Las hormigas poseen más de 400 receptores olfativos, así que el paso siguiente, en opinión de Zwiebel, consistirá en averiguar cuáles deben funcionar correctamente para reconocer el olor de una adversaria. (En el estudio se embotaron o se estimularon todos.)



Según Volker Nehring, biólogo en la Universidad de Friburgo que no ha participado en el estudio, esta investigación podría allanar el camino a nuevos estudios sobre el reconocimiento en el mundo animal. «No sabemos gran cosa sobre el reconocimiento olfativo del hormiguero propio, por lo que la interferencia temporal de los receptores sería un buen modo de ahondar en la cuestión.»

—Jillian Kramer

COMPORTAMIENTO ANIMAL

El aprendizaje de la migración

La pardela atlántica crea sus propias rutas sobre el mar

En hábitats esparcidos por todo el planeta, muchos animales cesan cíclicamente toda su actividad para emprender un viaje por tierra, mar o aire hasta nuevos lugares. Los geolocalizadores en miniatura brindan a los biólogos la posibilidad de indagar en esos desplazamientos estacionales como nunca antes. Algunas especies, como las ballenas o los gansos, aprenden las rutas migratorias siguiendo a sus progenitores y a otros congéneres veteranos. Otras, como ciertas aves canoras, llevan grabadas la distancia y la dirección del viaje en su código genético. Y otras emplean una combinación de herencia y cultura para orientarse en su migración.

Ahora bien, un cuarto grupo de viajeros, cuyo estudio solo comienza a ser factible ahora, no se ajusta a ninguno de esos modelos. Uno de sus representantes es la pardela atlántica (*Calonectris borealis*), un ave marina del orden de las procelariformes que migra cada año a través del Atlántico. Los jóvenes no viajan con los progenitores, por lo que la transmisión cultural no explica esos desplazamientos. Además, la ruta exacta varía ampliamente de un individuo a otro, lo cual descarta la herencia.

Especie longeva, la pardela raramente cría antes de los nueve años. Esto deja un lapso suficiente para el aprendizaje y la práctica de los desplazamientos migratorios. Los especialistas califican este mecanismo como «ajuste mediante exploración», algo que hasta la fecha había permanecido en gran parte en el terreno de la hipótesis por la dificultad que entraña el seguimiento de las migraciones de las aves durante tantas estaciones.

Un equipo de investigadores ha hecho exactamente eso fijando pequeños geolocalizadores a más de 150 pardelas de cuatro a nueve años de edad. El grupo comprobó así que las aves jóvenes recorren mayores distancias, durante más tiempo, y que sus rutas son más variadas que las de los adultos. «Por fin contamos con indicios sobre la hipótesis [del ajuste mediante exploración] en las aves migratorias», afirma Letizia Campioni, bióloga en el Instituto Universitario de Lisboa, que ha dirigido el estudio. Esta es la primera prueba en un ave marina, si bien investigaciones anteriores apuntaban a que otras aves longevas podrían usar la misma estrategia. El estudio se publicó en el número de enero del *Journal of Animal Ecology*.

Las pardelas jóvenes son capaces de volar tan rápido como las adultas, pero no lo hacen, lo cual incita a pensar que exploran más, una inclinación que desaparecería a medida que maduran, hasta acabar adoptando una ruta predilecta.

Quizá parezca menos eficiente que otras estrategias, pero el «ajuste mediante la exploración puede ser ventajoso para las aves y otros seres vivos en un mundo que cambia con gran rapidez a causa de las actividades humanas», matiza Barbara Frei, directora del Observatorio Ornitológico de McGill, que no ha participado en el estudio. «Tal vez sea más seguro repetir un comportamiento que ha demostrado su validez hace poco que confiar en señales que, aunque consolidadas desde hace tiempo, hayan dejado de ser seguras.»

—Jason G. Goldman

THOMAS FUCHS

CIENCIAS DE LA TIERRA

Cartografiar el continente helado

Un nuevo mapa del sustrato rocoso de la Antártida podría mejorar las predicciones sobre el aumento del nivel del mar

¿Qué partes de la Antártida se deshielan a medida que se calienta el planeta y cómo de rápido lo hacen? ¿Cuánto aumentará el nivel del mar como resultado? Para responder a estas preguntas, los científicos deben aprender todo lo posible sobre el vasto continente, aunque determinar su topografía oculta bajo el hielo suponga todo un reto. El contorno del sustrato rocoso de la Antártida revela el comportamiento de las «líneas de tierra» de los glaciares, las zonas donde el hielo pasa de apoyarse en el suelo a flotar sobre las aguas oceánicas. Si la línea se desplaza tierra adentro, el glaciar pierde más hielo.

El pasado diciembre se publicó en *Nature Geoscience* un mapa actualizado de dicho sustrato rocoso, elaborado a partir de datos de radar aerotransportado, de satélite, sísmicos y de la acumulación de nieve. Para completar los vacíos que dejaban los datos de radar, los autores emplearon un método más preciso basado en principios físicos, y hallaron notables diferencias respecto a mapas anteriores: por ejemplo, desviaciones de hasta 2000 metros en la elevación del sustrato rocoso.

El nuevo mapa anuncia buenas y malas noticias sobre la pérdida de hielo en distintas partes del continente. «Para la Antártida occidental no hay demasiada esperanza», señala Mathieu Morlighem, director del estudio y experto en ciencias de la Tierra de la Universidad de California en Irvine. «Pero en la Antártida oriental la situación es más heterogénea». Según Jonathan Bamber, glaciólogo de la Universidad de Bristol que no participó en el proyecto cartográfico, el trabajo subsana importantes lagunas en la topografía del sustrato rocoso del continente y «mejorará sensiblemente nuestra capacidad de simular y predecir la subida del nivel del mar».

—*Annie Sneed*

Bajo el hielo

Elevación

–3000 metros

4200 m

Terreno bajo el nivel del mar *(azul)*

Terreno sobre el nivel del mar *(marrón)*

Extensión actual del hielo *(borde)*

Línea de tierra actual *(negro)*
Zona donde el hielo pasa de apoyarse en el sustrato rocoso a flotar en el agua.

Bajo el glaciar Recovery

ANTÁRTIDA ORIENTAL

Bajo el glaciar Thwaites

Montañas Transantárticas

ANTÁRTIDA OCCIDENTAL

Bajo la plataforma de Ross

Bajo el glaciar Denman

50 kilómetros

Los anteriores mapas de la Antártida indicaban que la pendiente del sustrato rocoso bajo el glaciar Recovery ascendía hacia el interior del continente, lo que haría el glaciar menos vulnerable al retroceso de la línea de tierra y a la pérdida de hielo asociada. Pero el nuevo mapa muestra que la pendiente se inclina en sentido opuesto y eso podría presagiar un retroceso más rápido de la línea de tierra. Hasta ahora el glaciar se ha mantenido estable, pero «es una de las regiones más vulnerables de la Antártida oriental», según los autores del estudio.

Los investigadores descubrieron algo sorprendente bajo el glaciar Denman: un enorme cañón que se hunde más de 3500 metros bajo el nivel del mar, lo que lo convierte en el punto más profundo del planeta en tierra firme. Por desgracia, también hallaron que se trata de una región «muy vulnerable», ya que la pendiente del sustrato rocoso subyacente desciende hacia el interior. Eso implica que el grosor del hielo situado sobre la línea de tierra aumenta a medida que esta se interna en el continente, lo que conlleva una mayor pérdida de hielo y un retroceso aún más acusado de la línea. Por sí sola, esta región podría elevar el nivel del mar alrededor de 1,5 metros.

Thwaites es el glaciar antártico que cambia más deprisa, según Morlighem. Los investigadores no hallaron muchas crestas en el sustrato rocoso (las cuales ayudarían a frenar la pérdida de masa del glaciar): solo observaron dos y no parece probable que logren detener el retroceso de la línea de tierra y la consiguiente pérdida de hielo.

Una parte importante del hielo de la Antártida oriental se concentra en los glaciares que descienden por los valles de las montañas Transantárticas hasta la plataforma de hielo de Ross, así que la topografía del sustrato rocoso de esta zona es fundamental. Por suerte, los investigadores descubrieron una gran cresta que recorre la base de todos esos glaciares, lo que ayudará a estabilizar la región si se derrumba la plataforma de Ross.

FUENTE: «DEEP GLACIAL TROUGHS AND STABILIZING RIDGES UNVEILED BENEATH THE MARGINS OF THE ANTARCTIC ICE SHEET», POR MATHIEU MORLIGHEM ET AL., EN *NATURE GEOSCIENCE*, VOL. 13, PÁGS. 132-137, 12 DE DICIEMBRE DE 2019; KATIE PEEK *(mapa)*

BIOTECNOLOGÍA

Biología sintética de bajo coste

Crean una versión asequible de un instrumento de edición genética que normalmente cuesta miles de euros

Un grupo de ingenieros ha creado un nuevo dispositivo casero para abrir poros en las células, basado en las piezas de un mechero corriente. Bautizado como ElectroPen, se enmarca dentro del movimiento de la «ciencia accesible» (*frugal science*), que busca equipar a estudiantes e investigadores de campo con versiones económicas de instrumentos caros.

«La biología sintética es el futuro: ya no se trata de programar en un ordenador, sino de programar células vivas para que nos ayuden con los enormes retos que plantean las enfermedades, el cambio climático o la contaminación ambiental», señala Saad Bhamla, bioingeniero del Instituto Tecnológico de Georgia y uno de los creadores del ElectroPen. Pero para editar el genoma de una célula hacen falta más instrumentos que para modificar un programa informático. Así que Bhamla trabajó durante un par de años con la clase de ciencias de un instituto de secundaria local para desarrollar versiones baratas de varias de las herramientas necesarias, entre ellas un electroporador.

Para realizar pruebas de reacciones a fármacos o modificaciones de ADN, primero hay que atravesar las paredes que protegen las células. Un electroporador abre dichas membranas mediante una breve y potente descarga eléctrica. «La electroporación es básicamente una manera de crear poros en distintas células, lo que nos permite introducir en ellas ácidos nucleicos o proteínas, por ejemplo», explica Xavier de Mollerat du Jeu, de la compañía biotecnológica Thermo Fisher Scientific, que no intervino en el desarrollo de la herramienta. Los electroporadores suelen costar miles de euros y emplean circuitos electrónicos para generar descargas a medida. Sin embargo, existe un método más barato: usar cristales piezoeléctricos, que liberan carga eléctrica al someterlos a un esfuerzo mecánico. En enero, el grupo de Bhamla publicó en *PLOS Biology* una guía de código abierto para fabricar un electroporador a partir de un mechero de butano piezoeléctrico.

«Tenemos soluciones creativas al alcance de la mano», asegura Manu Prakash, bioingeniero de la Universidad Stanford y antiguo supervisor de Bhamla, que no participó en el nuevo estudio. «Todos hemos usado alguna vez un encendedor, y una de las cosas que encuentro fascinantes es que lo empleen con un propósito muy distinto.»

El ElectroPen produce una descarga de 2000 voltios en 5 milisegundos, mientras que las máquinas comerciales permiten ajustar el voltaje y la duración para adecuarlos a los requisitos de diversas aplicaciones. Pero el ElectroPen resulta mucho más asequible: por unos pocos euros, cualquiera puede construirse el suyo para permear al menos un tipo de célula. «Sin duda se necesita una manera económica de acceder a las células para que cualquiera pueda llevar a cabo este tipo de experimentos», valora Du Jeu. «Es bueno que se democratice.» De momento, los alumnos de secundaria han usado un ElectroPen para modificar el ADN de la bacteria *Escherichia coli* y conseguir que produzca proteínas fluorescentes.

Mientras, Bhamla ya piensa en su próximo proyecto de ciencia accesible. Fabricar instrumentos baratos es, en sus propias palabras, «como suministrar un teléfono: dejas que sean otros los que piensen qué aplicación quieren desarrollar, qué célula quieren modificar, qué reto quieren perseguir».

—Sophie Bushwick



Dispositivos ElectroPen.

CHRISTOPHER MOORE, INSTITUTO TECNOLÓGICO DE GEORGIA (*electroporadores*); ESPERANZA MENÉNDEZ (*arena al microscopio*)

AGENDA

CONFERENCIAS VIRTUALES

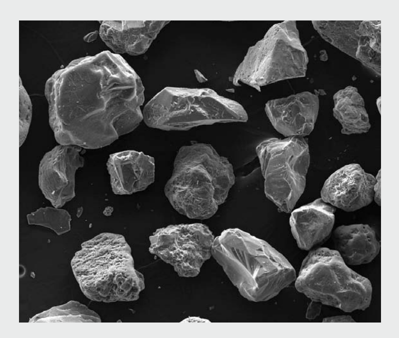
4 de mayo
Biografía de los polimotores del Museo del Aire
Herminio Jarabo, expiloto
Fundación Infante de Orleans
fio.es

EXPOSICIONES VIRTUALES

La gripe de 1918
Universidad de Valencia
colecciones.uv.es/s/la-gripe-de-1918

El océano en casa (*en catalán*)
Instituto de Ciencias del Mar
icmdivulga.icm.csic.es

Lo que tu ojo no ve
Instituto de Ciencias de la Construcción Eduardo Torroja
www.ietcc.csic.es



OTROS

5, 12 y 19 de mayo – Cinefórum virtual
Cine con ciencia
Universidad de Sevilla
cicus.us.es

Hasta el 31 de mayo
Mi visita al Museo Nacional de Ciencias Naturales
Concurso infantil de relato breve y pintura
(El museo se puede visitar virtualmente en www.mncn.csic.es/es/visita-el-mncn/exposiciones/visitas-virtuales)
www.mncn.csic.es

Hasta el 31 de mayo
Concurso de micro y nanorrelatos
Para alumnos desde 3.º de ESO a 2.º de Bachillerato
Convoca: Festival de Nanociencia y Nanotecnología 10 a la menos 9
10alamenos9.es

Hasta el 7 de junio
Inspiraciencia
Concurso de relatos de inspiración científica
Convoca: CSIC
www.inspiraciencia.es

MEDIOAMBIENTE

El largo y tortuoso camino de la adaptación costera al cambio climático

La vulnerabilidad de las costas españolas no solo exige soluciones inmediatas, sino medidas que permitan una adaptación a largo plazo

JOSÉ A. JIMÉNEZ

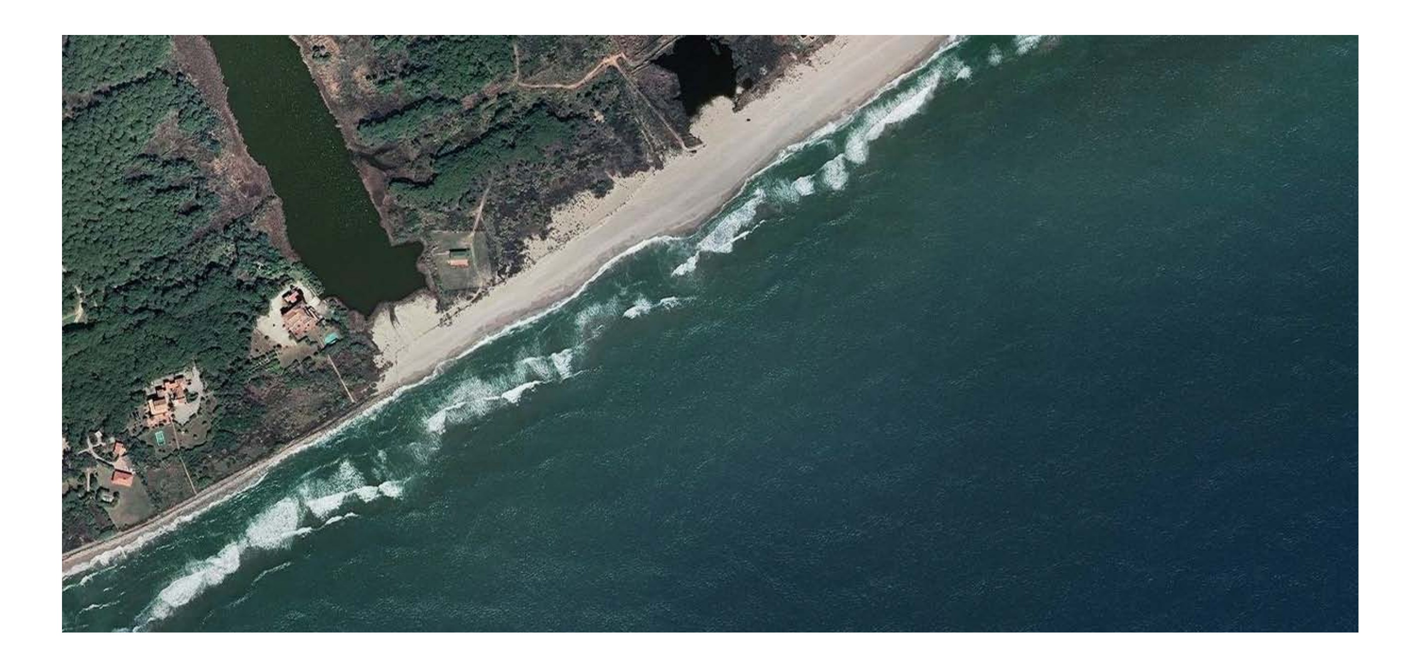


EL HUMEDAL DE LA PLETERA, en l'Estartit (Gerona), se ha recuperado de una zona anteriormente construida. Constituye un ejemplo de adaptación al cambio climático al ofrecer amortiguación frente a temporales y al ascenso del nivel del mar.

AYUNTAMIENTO DE TORROELLA DE MONTGRÍ (WWW.LIFEPLETERA.COM)

Después de cada temporal, como el Gloria, el último que impactó en nuestras costas, observamos el rastro que deja en playas, viviendas e infraestructuras. Y solemos referirnos al cambio climático para explicar los daños, cada vez más graves con cada episodio. En parte es cierto, pero no porque haya más temporales o estos sean más intensos (o no solo por ello), sino porque incluso cambios pequeños, como la subida del nivel del mar (pocos milímetros por año), tienen un efecto acumulativo en la costa que hace que las playas vayan erosionándose progresivamente y ofrezcan cada vez una menor protección frente al impacto de nuevas tormentas.

Así, incluso aunque se acuerden y se implementen políticas de mitigación del cambio climático, las alteraciones previstas bajo los escenarios menos pesimistas a lo largo de este siglo requerirán diseñar y aplicar medidas de adaptación que permitan la conservación y el uso de la costa. En este contexto, y dada la vulnerabilidad de nuestro litoral, el Gobierno aprobó en 2017 la llamada Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española, cuyos objetivos generales son incrementar la resiliencia de la costa al cambio



EN EL DELTA DEL LLOBREGAT, los muros de escollera ofrecen protección a infraestructuras o propiedades costeras, pero a la larga conducen a la desaparición de la playa (*parte inferior izquierda*). En cambio, si existe un espacio de acomodación sin obstáculos rígidos, el retroceso de la línea de costa va acompañado de una reconstrucción natural de la playa (*parte superior derecha*). Por desgracia, actualmente el muro se ha extendido hacia el Norte y ello ha eliminado esa capacidad de reconstrucción.

INSTITUTO CARTOGRÁFICO Y GEOLÓGICO DE CATALUÑA

climático y a la variabilidad del clima, e integrar tales aspectos en la planificación y la gestión.

En un artículo recién publicado en *Science of The Total Environment* por nuestro laboratorio junto con colaboradores del Foro Global del Clima, en Berlín, hemos evaluado cómo se están aplicando las medidas que prevé esta estrategia y hemos analizado el modo en que contribuirán a adaptarse a largo plazo al cambio climático y a otras alteraciones humanas. Además, hemos contrastado estas medidas de adaptación con las de protección, cuyo principal objetivo es dar una respuesta más inmediata a los problemas actuales, como los daños que generan los temporales cada año en las costas. Este trabajo se enmarca en el proyecto M-CostAdapt

Respuesta inmediata o a largo plazo

La adaptación al cambio climático y, específicamente, a la subida del nivel del mar, suele entrañar inversiones a gran escala con un tiempo de planificación y ejecución largo o muy largo, y repercusiones sociales potencialmente relevantes para las generaciones actuales y futuras. Por ello, es importante evaluar estas inversiones en todo su recorrido para situarlas en el contexto de la planificación costera «normal», es decir, la que se hace o hacía a corto plazo sin incluir los efectos del cambio climático. Hay que tener en cuenta que a veces la implementación de estos planes más inmediatos no es la adecuada o no se ha hecho teniendo en cuenta las características locales. Así, en ocasiones se han puesto en marcha acciones que a priori funcionan como medidas de adaptación, pero se ejecutan con objetivos a corto plazo o sin considerar su encaje en la planificación a largo plazo, lo que cuestiona su validez.

Un claro ejemplo lo vemos en aquellas zonas que están sometidas, ya en las condiciones presentes, a un fuerte proceso de erosión y donde la acción de los temporales se deja sentir un año sí y otro también. La recurrencia de estos problemas y la presión de la población afectada hacen que a veces se tomen decisiones cortoplacistas, como sería la construcción de un muro de escollera a lo largo de la costa. Si bien esta medida evita de forma inmediata el efecto de los temporales, a largo plazo conllevará una modificación sustancial del borde marítimo (desaparición de la playa), posibles afectaciones a zonas cercanas y costes crecientes de mantenimiento.

En algunos casos, la solución a largo plazo más adecuada puede ser el retroceso de las construcciones humanas, lo que supone el abandono planificado de la zona más externa de la costa y la relocalización de las actividades o de la población afectada. Esto permite reducir notablemente los daños y los costes crecientes derivados de la protección inmediata, a la vez que favorece el mantenimiento de una costa natural y no afecta negativamente a zonas cercanas.

Sin embargo, esta medida es la que presenta mayores obstáculos sociales, debido a la reticencia de la población a abandonar las zonas costeras ocupadas (no ya ante la perspectiva del cambio climático y daños futuros, sino incluso, ante el escenario actual de impactos y daños sucesivos). Baste para ello ver, tras el impacto de temporales en nuestra costa, cómo los propietarios de viviendas y terrenos afectados reclaman ayudas para volver a reconstruir lo afectado en el mismo lugar.

Si medimos la experiencia al respecto durante la aplicación de la Ley de Costas, el resultado es bastante decepcionante. En la mayoría de los casos, se convierte en un proceso administrativo muy largo, en el que la población afectada utiliza todos los recursos administrativos y judiciales posibles para evitar ser reubicada. Por tanto, si se considera esta opción en los actuales planes de adaptación, hay que

iniciar el largo proceso administrativo y el todavía más largo trabajo de negociación con la población lo antes posible.

En aquellas zonas donde se ha procedido a eliminar las construcciones existentes y recuperar la funcionalidad costera, los resultados, aun en su fase inicial, han demostrado ser excelentes. Un ejemplo lo ofrece el proyecto de restauración ecológica de La Pletera, en Gerona, que se enmarcó en el programa LIFE de la Unión Europea y que fue financiado por diferentes administraciones. En él se recuperó la integridad de un sistema lagunar costero mediante la deconstrucción de zonas urbanizadas (abandonadas) y la restauración de los anteriores humedales y su funcionamiento ecológico. Aunque el objetivo del proyecto era la restauración ambiental, el enfoque adoptado para aumentar y mejorar el espacio de acomodación de la costa puede incluirse fácilmente en cualquier plan de adaptación al cambio climático. A esta actuación y otras del mismo tipo, como la reconstrucción de dunas costeras, se las denomina «medidas basadas en la naturaleza». Todas tratan de favorecer la resiliencia natural de la costa y son en la actualidad el santo grial de las estrategias de adaptación costera.

No obstante, estas no siempre podrán aplicarse en todos los lugares, por lo que se necesitará diseñar estrategias flexibles adecuadas a las características locales. Ello implicará valorar la eficiencia de cada actuación en un determinado lugar en función de criterios técnicos, económicos, financieros, ambientales y sociales. En este contexto, es importante analizar cómo se están realizando las inversiones de la Estrategia de Adaptación al Cambio Climático de la Costa Española, incluso en una etapa temprana como la que nos encontramos, para poder identificar posibles disfunciones y situarlas en el contexto de la planificación costera a largo plazo.

¿Cómo se están aplicando las medidas?

En general, la protección de las costas y las actuaciones de acomodación al cambio climático están muy interrelacionadas. En la actualidad, y a falta de la redacción de planes de adaptación específicos para las diferentes comunidades autónomas costeras, el Ministerio de Transición Ecológica financia diferentes medidas a través del Plan PIMA Adapta-Costa (incluido en la Estrategia de Adaptación).

Según los datos recopilados por nuestro estudio, las regiones con las mayores inversiones actuales en adaptación están situadas a lo largo de la costa mediterránea: Andalucía, Cataluña y Comunidad Valenciana. Estas regiones presentan características comunes: una línea de costa larga, un elevado PIB y un litoral muy vulnerable. Esto indica una racionalidad en cuanto a la financiación, es decir, las regiones más vulnerables y económicamente importantes concentran, en esta fase inicial, las inversiones para avanzar hacia una mejor adaptación.

Habrá que valorar la eficiencia de cada actuación en un determinado lugar en función de criterios técnicos, económicos, financieros, ambientales y sociales

Sin embargo, las medidas se están ejecutando en zonas que experimentan problemas en las condiciones climáticas actuales. De hecho, la mayoría no se diseñaron específicamente para condiciones futuras, sino que formaban parte de proyectos de protección. Así pues, aunque formalmente contribuirían a la adaptación al mejorar el estado de la costa, la realidad es que tenían que ser ejecutadas incluso en ausencia de cambio climático. En otras palabras, han sido etiquetadas como una medida de adaptación, pero en su mayoría están diseñadas para resolver los problemas actuales.

Solucionar los problemas de hoy bajo la etiqueta de la adaptación presenta dos caras. En el lado positivo, permite mejorar el estado actual de la costa, lo que de alguna manera promoverá su capacidad de adaptación a los cambios futuros. Sin embargo, a menos que en el diseño de las medidas se tengan en cuenta los efectos inducidos por el clima en el futuro, las inversiones serán insuficientes. En el lado negativo, hay que subrayar que el uso indebido del concepto de medida de adaptación cuando esta no lo es realmente provocará confusión y desconfianza en la sociedad. Para evitar este riesgo, es necesario contar con una hoja de ruta clara para aplicar las medidas de adaptación y una estructura de financiación adecuada.

Hasta ahora, todas las acciones de adaptación costera han sido financiadas con fondos públicos. Ello es consecuencia de la política tradicional de nuestras costas, que asigna al Estado la competencia, el derecho y la obligación de protegerlas. Pero, dada la magnitud del problema, la Estrategia Española tiene en cuenta otras alternativas. Así, la selección de medidas que cumplan los objetivos generales de sostenibilidad y, al mismo tiempo, permitan satisfacer las necesidades específicas de algunos actores privados puede constituir una oportunidad para que estos contribuyan a su financiación. Un ejemplo claro sería el caso de zonas con una importante industria del turismo de sol y playa, cuya supervivencia y rentabilidad dependerá del mantenimiento de una costa con unas buenas condiciones. La financiación de la adaptación costera podría considerarse un coste adicional en este sector.

Finalmente, hay que tener en cuenta que, aunque parezca que el recurso más necesario para la adaptación sea el dinero, el recurso en declive más evidente es el tiempo. La demora en la toma de decisiones y la no adopción de medidas adecuadas y oportunas durante las etapas iniciales darán lugar a costes más elevados en el futuro.

José A. Jiménez *es catedrático de ingeniería y gestión de costas en la Universidad Politécnica de Cataluña.*

PARA SABER MÁS

Financing and implementation of adaptation measures to climate change along the Spanish coast. Uxia López-Doriga et al. en *Science of the Total Environment*, vol. 712, art. 135685, abril de 2020.

Página web del proyecto M-CostAdapt (MINECO/AEI/FEDER, UE) **http:mcostadapt.upc.edu**

EN NUESTRO ARCHIVO

Dunas costeras. M.ª Luisa Martínez en *IyC*, agosto de 2008.

Playas agotadas. José A. Jiménez en *IyC*, mayo de 2011.

EPIDEMIOLOGÍA

El enigma de las infecciones asintomáticas de COVID-19

Se teme que un gran número de personas infectadas por el nuevo coronavirus carezcan de síntomas y puedan desencadenar nuevos brotes. Los científicos se esfuerzan por estimar cuántas son

JANE QIU



IMAGEN DEL METRO de la ciudad de Incheon, en Corea del Sur, el 5 de febrero de 2020.

GETTY IMAGES/GOLDCASTLE7/ISTOCK

A medida que los brotes causados por el nuevo coronavirus aumentan en todo el mundo, los investigadores se esfuerzan por entender un rompecabezas epidemiológico clave: qué proporción de las personas infectadas carecen de síntomas o presentan solo síntomas leves y podrían estar contagiando a otras. Algunas estimaciones de estos casos ocultos sugieren que podrían llegar al 60 por ciento de todas las infecciones.

Son muchos los expertos que sospechan que existe un conjunto no detectado de casos asintomáticos, ya que el aumento en el número de contagios no puede explicarse únicamente a partir de los casos confirmados de COVID-19 ni por viajes a las zonas con brotes ya declarados. La mayoría de las personas con infecciones leves no estarían lo suficientemente enfermas como para buscar ayuda médica y probablemente pasarían por alto los métodos de detección, como los controles de temperatura corporal. Como consecuencia, el alcance del fenómeno y su papel en la transmisión del virus ha sido hasta ahora muy difícil de evaluar.

«Conocer la proporción de casos leves o asintomáticos va a ser muy importante a la hora de entender qué es lo que está impulsando esta epidemia», apunta Michael Osterholm, director del Centro de Investigación y Medidas contra las Enfermedades Infecciosas de la Universidad de Minnesota.

Esta línea de investigación es distinta de la que intenta estimar el número de «casos sin reportar», los cuales incluyen aquellos que se han pasado por alto porque las autoridades no han efectuado un número suficiente de tests, así como los casos preclínicos, en los que la persona está incubando la enfermedad pero aún no muestra síntomas.

Casos sin detectar

Para calibrar el alcance de estas infecciones ocultas, un equipo de investigadores de China y EE.UU. ha elaborado un modelo basado en los datos clínicos de 26.000 casos confirmados en el laboratorio y notificados en Wuhan, la ciudad china en la que se originó el brote.

En una prepublicación (artículo aún sin revisar por otros científicos) aparecida en línea el 6 de marzo, los investigadores sugieren que, para el 18 de febrero de 2020, en Wuhan había 37.400 personas infectadas y sin detectar por parte de las autoridades. Según los autores, la mayoría de esos casos habrían correspondido a personas asintomáticas o con síntomas leves que, sin embargo, aún podían transmitir el virus.

«Nuestra estimación más conservadora es que al menos el 59 por ciento de los individuos infectados estuvieron haciendo vida normal, sin haberse hecho las pruebas y potencialmente contagiando a otros», afirma Wu Tangchun, experto en salud pública de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Huazhong en Wuhan y líder del estudio. «Eso podría explicar por qué el virus se propagó tan rápidamente por Hubei [la provincia a la que pertenece Wuhan] y ahora está circulando por todo el mundo.»

Los resultados del equipo se encuentran dentro del abanico de estimaciones a las que han llegado otros trabajos basados en conjuntos de datos mucho menores, explica Adam Kucharski, experto en modelización matemática de epidemias de la Escuela de Higiene y Medicina Tropical de Londres. «Es el análisis más reciente del mejor conjunto de datos del que disponemos», sostiene, y su metodología es sólida.

Con todo, el modelo da por sentado que todos los miembros de una comunidad tienen la misma probabilidad de contacto con cualquier otro individuo. Sin embargo, «todos tenemos más posibilidades de interactuar con una pequeña fracción de personas: la familia, los amigos y los compañeros de trabajo», matiza Gerardo Chowell, epidemiólogo matemático de la Universidad Estatal de Georgia en Atlanta. Suponer una mezcla homogénea probablemente sobreestima la tasa de transmisión y exagera el número de infecciones asintomáticas o con síntomas leves. A pesar de ello, el experto considera que el resultado final se halla en el intervalo adecuado.

Cúmulo de indicios

Otro estudio examinó a 565 ciudadanos japoneses que fueron evacuados de Wuhan a principios de febrero y a quienes se les sometió a repetidas pruebas y controles para detectar el virus y los síntomas. En un artículo publicado el 13 de marzo en el *International Journal of Infectious Diseases*, un equipo de Japón informó que 13 de los evacuados habían contraído la infección. De ellos, 4 (el 31 por ciento) nunca desarrollaron síntomas.

Probablemente, los mayores indicios documentados de casos asintomáticos sean los que ha proporcionado el crucero *Diamond Princess*, que sufrió un brote de COVID-19 a principios de febrero mientras surcaba aguas japonesas. El barco fue puesto en cuarentena y los 3711 pasajeros y miembros de la tripulación fueron repetidamente examinados y monitorizados.

Al respecto, un estudio publicado el 12 de marzo en *Eurosurveillance* por Chowell y otros colaboradores muestra que el 18 por ciento de los cerca de 700 individuos infectados en el *Diamond Princess* nunca mostraron síntomas.

«Hay que tener en cuenta que se trataba de un grupo de población especial», con muchos ancianos, advierte Chowell. Las personas mayores tienden a sufrir más complicaciones cuando se ven infectadas por el nuevo coronavirus, por lo que todo indica que la tasa de infecciones asintomáticas en una población genérica estaría más cerca del 31 por ciento referido por el equipo japonés.

Al tomar en consideración los resultados de varios trabajos, Chowell estima que el total de casos leves o asintomáticos podría representar entre el 40 y el 50 por ciento de todas las infecciones.

Contagio asintomático

Pero ¿pueden las personas asintomáticas o con síntomas leves contagiar a otras? En una prepublicación aparecida el 8 de marzo, un equipo con base en Alemania mostró que algunos pacientes de COVID-19 presentaban una alta carga vírica en la garganta al principio de la enfermedad, cuando los síntomas eran leves. Eso significa que el patógeno podría liberarse fácilmente a través de la tos o los estornudos y contagiar a otras personas, explican los investigadores.

En China, otro grupo detectó una elevada carga vírica en 17 personas que acababan de enfermar. Además, otro individuo infectado pero que nunca desarrolló síntomas presentó asimismo una alta cantidad de patógenos, han informado los investigadores en *The New England Journal of Medicine*.

Osterholm señala que estos son los primeros análisis detallados sobre la capacidad para transmitir el virus en las distintas etapas de la enfermedad. Y los datos confirman lo que muchos científicos ya sospechaban: que algunas personas infectadas «pueden ser muy contagiosas aun cuando solo tengan síntomas leves o incluso no presenten síntomas», añade, aunque subraya que la magnitud del problema aún no está clara.

Muchos expertos temen que todo esto haya llevado a subestimar la capacidad de los niños para contraer el patógeno. Un estudio con más de 2000 niños infectados en China encontró que el 56 por ciento carecía de síntomas o que estos solo eran leves.

Si estos hallazgos se confirman será necesario tomar medidas urgentes para frenar los casos leves y asintomáticos que están alimentando la pandemia, afirman los investigadores, quienes piden que se cierren las escuelas, se cancelen los eventos públicos y que, en general, se mantenga a la gente en sus casas y ajena a la vida pública.

«La única manera de impedir que el virus se propague es aplicar fuertes medidas de distanciamiento social», concluye Chowell.

Jane Qiu *es periodista científica.*

Artículo original publicado en nature.com el 20 de marzo de 2020. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2020

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Epidemiological characteristics of 2143 pediatric patients with 2019 coronavirus disease in China. Yuanyuan Dong et al. en *Pediatrics*, vol. 145, n.º 3, 1 de marzo de 2020.

Evolving epidemiology and impact of non-pharmaceutical interventions on the outbreak of coronavirus disease 2019 in Wuhan, China. Chaolong Wang et al. en medRxiv, 6 de marzo de 2020.

Clinical presentation and virological assessment of hospitalized cases of coronavirus disease 2019 in a travel-associated transmission cluster. Roman Woelfel et al. en medRxiv, 8 de marzo de 2020.

Estimating the asymptomatic proportion of coronavirus disease 2019 (COVID-19) cases on board the Diamond Princess cruise ship, Yokohama, Japan, 2020. Kenji Mizumoto et al. en *Eurosurveillance*, vol. 25, n.º 10, 12 de marzo de 2020.

Estimation of the asymptomatic ratio of novel coronavirus infections (COVID-19). Hiroshi Nishiura et al. en *International Journal of Infectious Diseases* (en prensa); publicado en línea el 13 de marzo de 2020.

SARS-CoV-2 viral load in upper respiratory specimens of infected patients. Lirong Zou et al. en *The New England Journal of Medicine*, vol. 382, n.º 12, 19 de marzo de 2020.

VULCANOLOGÍA

El origen de la caldera de Las Cañadas

Un trabajo de revisión propone una nueva solución al largo debate sobre la formación de esta estructura tinerfeña. Las conclusiones entrañan importantes consecuencias socioeconómicas

JOAN MARTÍ MOLIST



CORTESÍA DEL AUTOR

SECTOR ORIENTAL de la caldera de Las Cañadas, con el domo de montaña Rajada en primer plano.

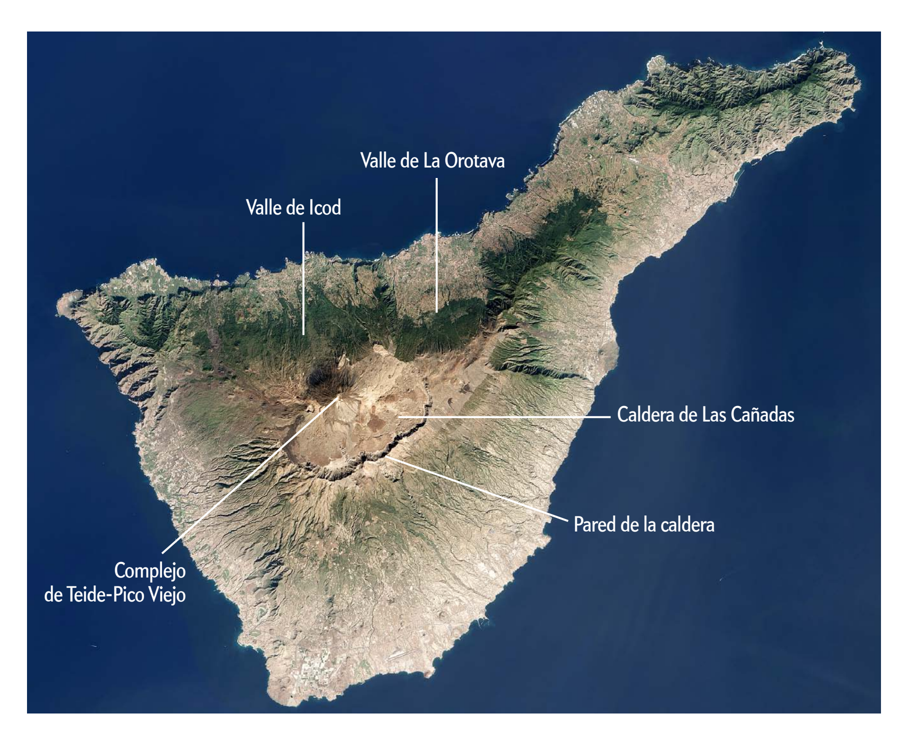
La caldera de Las Cañadas, en Tenerife, constituye uno de los paisajes geológicos más bellos de nuestro planeta y una de las morfologías volcánicas mejor expuestas y más interesantes de cuantas conocemos. Prueba de ello es el interés que siempre ha despertado en la comunidad científica internacional, habiendo sido objeto de estudio, de forma más o menos continuada, desde la mitad del siglo XIX hasta nuestros días. Tales trabajos se han centrado tanto en la propia caldera como en el complejo volcánico de Teide-Pico Viejo, el cual se levanta en su interior.

Por lo general, se denomina caldera volcánica a la depresión creada por el hundimiento de un edificio volcánico dentro de su propia cámara magmática durante una erupción. Ejemplos recientes de la formación de este tipo de depresiones los hallamos en la isla de Santorini, en Grecia, cuyo origen durante una gran erupción ocurrida hace unos 3600 años se asocia a la desaparición de la civilización minoica; o en la caldera de Krakatoa, en Indonesia, la cual se creó tras una gigantesca erupción ocurrida en 1883 y a la que siguió un tsunami que causó más de 30.000 víctimas.

Sin embargo, el término *caldera* se reserva también para otras depresiones volcánicas de origen muy distinto: aquellas formadas por erosión fluvial del terreno volcánico o por un gran deslizamiento que afectó a una ladera del volcán. Por esta razón, las primeras reciben el nombre de «calderas de colapso», mientras que las segundas se conocen como «calderas de erosión» o «de deslizamiento».

En ocasiones, sin embargo, discernir el origen de la depresión que observamos en la actualidad no resulta sencillo, lo que obliga a reconstruir el pasado geológico de la zona. Los elementos que permiten identificar la formación de una caldera son su morfología, naturaleza, edad y la distribución de los depósitos volcánicos asociados, así como su estructura interna, siempre y cuando esta pueda «radiografiarse» por medio de técnicas geofísicas, algo que no siempre resulta posible.

En el caso de la caldera de Las Cañadas, su origen siempre ha suscitado polémica. A pesar del gran número de estudios geológicos, vulcanológicos, geofísicos y geomorfológicos que se han efectuado a lo largo de los años, su génesis continúa siendo incierta. Hay quienes piensan que es el resultado del hundimiento del edificio volcánico dentro de su cámara magmática como consecuencia de una sucesión de episodios eruptivos. Otros investigadores, sin embargo, consideran que la caldera tinerfeña corresponde a la cabecera (la parte más elevada) del valle de Icod, el cual se formó por uno o varios deslizamientos hacia el norte de parte de la isla de Tenerife.



EL COMPLEJO VOLCÁNICO de Teide-Pico Viejo, en Tenerife, se encuentra situado en el interior de la caldera de Las Cañadas, una gran depresión rodeada por una pared salvo en su flanco septentrional. Durante años se ha debatido si esta estructura se formó a causa del hundimiento del edificio volcánico durante una erupción, o como consecuencia de los deslizamientos de terreno que dieron lugar a los valles de Icod y La Orotava, al norte de la isla.

NASA

Por un lado, la controversia sobre su origen surge de la imposibilidad de observar su interior de forma directa, ya que se trata de una estructura relativamente joven, poco erosionada y cubierta por los productos posteriores de los volcanes Teide y Pico Viejo. Por otro, el registro geológico de la isla muestra indicios claros de grandes erupciones capaces de generar calderas volcánicas, pero también de deslizamientos que han afectado y modificado la morfología de algunos de sus flancos. Es decir, sabemos que los eventos de colapso y los grandes deslizamientos han coexistido durante el proceso de formación de la isla de Tenerife, aunque en ocasiones sus límites y relaciones temporales se confunden.

Entender la formación de la caldera de Las Cañadas reviste gran importancia, ya que supone entender cómo funcionan y evolucionan los grandes volcanes. En un trabajo reciente publicado en *Earth-Science Reviews*, hemos revisado toda la información disponible sobre el origen de la caldera de Las Cañadas y su controversia. Un análisis exhaustivo de dichas pruebas revela que la estructura tinerfeña no se originó en un único evento, sino a raíz de varios procesos de colapso espaciados a lo largo del tiempo geológico, a los cuales habrían seguido los deslizamientos que dieron lugar a los valles de La Orotava e Icod. Estos resultados no solo permiten armonizar los distintos hallazgos vulcanológicos, sino que implican importantes consecuencias para el futuro socioeconómico de la isla.

Una nueva visión

En nuestro caso el volcán es toda la isla de Tenerife, la cual incluye no solamente la caldera de Las Cañadas y el complejo de Teide-Pico Viejo, sino varios vestigios de otros muchos volcanes que se formaron y destruyeron a lo largo de la compleja historia de la isla.

Los datos geofísicos, estratigráficos, vulcanológicos, estructurales, geocronológicos y petrológicos existentes apoyan con solidez la existencia de múltiples colapsos durante la formación de la caldera tinerfeña. En este sentido, Las Cañadas no diferiría de muchas otras calderas «clásicas» originadas por procesos de colapso vertical, como la ya mencionada caldera de Santorini; las de Crater Lake y Long Valley, en EE.UU.; o las de Campos Flégreos y Somma-Vesuvio, en Italia.

Sin embargo, esos mismos estudios no niegan la existencia de procesos de deslizamiento que pudiesen haber modificado algún sector de la caldera. Por ejemplo, la geología de las galerías de agua que perforan las vertientes de la isla de Tenerife (una de sus características más representativas) demuestra la existencia de un gran deslizamiento en el valle de Icod. Así pues, ¿qué cadena de procesos condujeron a la formación de la estructura que vemos en la actualidad?

Una revisión de toda la información publicada sobre el fenómeno a lo largo de los años permite desglosar las claves para una correcta interpretación de esta fascinante depresión volcánica. Por un lado, es posible abogar por un origen eruptivo, al identificar al menos tres de estos episodios durante su formación. Estos ocurrieron hace un millón, 560.000 y 180.000 años, respectivamente, y sus depresiones resultantes se solaparon de manera parcial, lo que dio lugar a lo que hoy es la totalidad de la caldera que observamos. No obstante, la sismicidad generada durante esos procesos eruptivos disparó el deslizamiento de partes de las laderas de Tenerife, lo que originó la formación de los grandes valles de deslizamiento, como el de Icod o La Orotava, hacia el norte de la isla. A su vez, estos generaron tsunamis, cuyos restos pueden reconocerse en diversos puntos por encima de las actuales costas de Tenerife.

Esta nueva visión del origen de la caldera de Las Cañadas insiste en el hecho de que la depresión volcánica no se formó como consecuencia de un único evento. Antes bien, sería el resultado de varios procesos de colapso repartidos a lo largo del tiempo geológico. Ello impide adscribir su origen únicamente a la formación del valle de Icod. Pero, de igual modo, se debe aceptar que este valle, como ocurre con los de Güimar y La Orotava, fue el resultado de uno o varios episodios de deslizamiento lateral a gran escala y cuya cabecera se situaría hoy bajo los volcanes Teide y Pico Viejo. Esto permite explicar la desaparición de la parte superior de un sector de la pared norte de la caldera, sin que ello implique que dicho deslizamiento llegase a excavar el interior de la depresión caldérica.

Así pues, la aparente contradicción entre las dos hipótesis que se han propuesto para explicar la formación de la caldera de Las Cañadas puede solucionarse de forma simple admitiendo que ambos tipos de procesos, de colapso y de deslizamiento, pudieron estar relacionados temporal e incluso mecánicamente

¿COLAPSO O DESLIZAMIENTO?

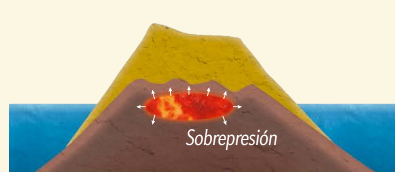
LAS DOS HIPÓTESIS que se han propuesto para explicar la formación de la caldera de Las Cañadas pueden armonizarse admitiendo que ambos tipos de fenómenos, de colapso y de deslizamiento, tuvieron lugar. La solución radica en admitir que los primeros (*d*) fueron causa de los segundos (*e*) y que ambos afectaron a porciones distintas de la isla de Tenerife. Este esquema muestra el proceso completo a partir de la última gran erupción de la que se tiene constancia, ocurrida hace 180.000 años.

a **Situación inicial**



Estado de equilibrio. Los materiales del edificio de Las Cañadas residen sobre la parte antigua de la isla.

b **Hace 180.000 años**



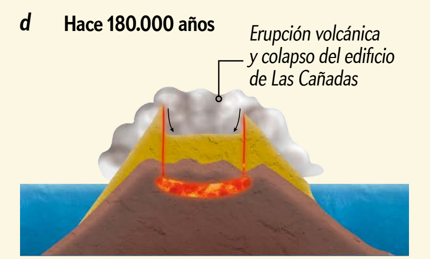
Se inicia el desequilibrio debido a una sobrepresión de la cámara magmática causada por una nueva intrusión de magma.

c **Hace 180.000 años**



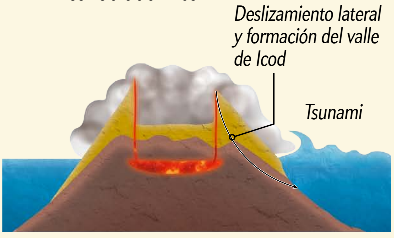
La sobrepresión genera sismicidad en toda la isla. Comienza el colapso lateral de la parte submarina de la ladera norte.

d **Hace 180.000 años**



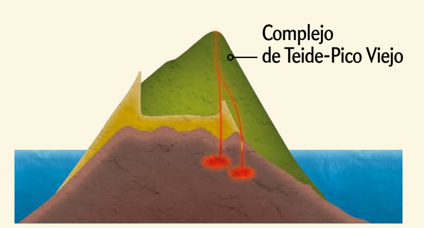
La deformación prosigue y se inicia la erupción que culmina en la formación de una caldera por colapso vertical.

e **Hace 180.000 años**



El colapso desencadena el deslizamiento de la vertiente norte, lo que da lugar al valle de Icod. La caída de rocas al mar provoca un tsunami.

f **Situación actual**



A lo largo de los años, la acumulación de material volcánico dará lugar la formación del complejo volcánico de Teide-Pico Viejo.

ADAPTADO DE «LAS CAÑADAS CALDERA, TENERIFE, CANARY ISLANDS: A REVIEW, OR THE END OF A LONG VOLCANOLOGICAL CONTROVERSY», JOAN MARTÍ EN *EARTH-SCIENCE REVIEWS*, VOL. 196, ART. 102889, SEPTIEMBRE DE 2019.

(en el sentido de que uno pudo ser la causa del otro), siempre que aceptemos que ambos afectaron a porciones distintas de la isla de Tenerife.

Más allá de la vulcanología

Conocer el verdadero origen de la caldera de Las Cañadas reviste importancia no solo desde un punto de vista vulcanológico, sino también socioeconómico, ya que de ello depende en parte el propio desarrollo de la isla. Al respecto, me gustaría concluir con dos reflexiones.

El modelo hidrogeológico de Tenerife, de implicaciones económicas considerables, depende en gran medida del modelo formativo de la caldera. Este se sustenta actualmente en la hipótesis del deslizamiento, lo que implica que se asume una distribución, geometría y volumen del acuífero contenido en la depresión, los cuales pueden ser muy distintos si nos hallamos ante una caldera de colapso. Como consecuencia, la estimación de los recursos hidrogeológicos de la isla podría no ser del todo correcta. Recordemos que el acuífero de Las Cañadas ha sido hasta ahora el mayor suministrador de agua dulce de Tenerife.

Por otro lado, de igual trascendencia resulta el origen de la caldera a la hora de evaluar el riesgo en la isla. El peligro geológico en Tenerife no solo viene marcado por la posibilidad de erupciones volcánicas de cierta magnitud, sino por la aparición de otros fenómenos como sismicidad, grandes deslizamientos y tsunamis, tal y como se ha observado en al menos dos ocasiones durante la formación de la caldera de Las Cañadas. Por tanto, esto debería tenerse en cuenta al estimar al riesgo geológico en la isla, por más que la recurrencia de tales procesos sea muy baja.

¿Cuál debería ser nuestra percepción del riesgo en caso de considerar que el Teide se alza en el interior de una caldera de colapso en lugar de sobre un plano de deslizamiento? La importancia de estas preguntas nos obliga a seguir investigando.

Joan Martí Molist *es profesor de investigación en el Instituto de Ciencias de la Tierra Jaume Almera del CSIC, en Barcelona.*

PARA SABER MÁS

The Las Cañadas caldera (Tenerife, Canary Islands): An overlapping collapse caldera generated by magma-chamber migration. J. Martí y A. Gudmundsson en *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol. 103, n.º 1-4, págs. 161-173, diciembre de 2000.

New sonar evidence for recent catastrophic collapses of the north flank of Tenerife, Canary Islands. A. Watts y D. Masson en *Bulletin of Volcanology*, vol. 63, págs. 8-19, mayo de 2001.

Las Cañadas caldera, Tenerife, Canary Islands: A review, or the end of a long volcanological controversy. Joan Martí en *Earth-Science Reviews*, vol. 196, art. 102889, septiembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Calderas volcánicas gigantes. Peter Francis en *IyC*, agosto de 1983.



COSMOLOGÍA

LA CRISIS EN TORNO A LA CONSTANTE DE HUBBLE

Dos mediciones discrepan sobre la velocidad a la que se expande el universo y no es posible que ambas sean correctas. Algo falla, pero ¿qué?

Richard Panek

Ilustración de Mark Ross Studios



Richard Panek es escritor científico. Es autor de libros como *The 4% universe: Dark matter, dark energy, and the race to discover the rest of reality* (Houghton Mifflin Harcourt, 2011) o el reciente *The trouble with gravity: Solving the mystery beneath our feet* (Houghton Mifflin Harcourt, 2019).



HACIA FINALES DEL SIGLO XX, EL MODELO COSMOLÓGICO ESTÁNDAR parecía completo. Lleno de misterios, eso sí, y de fértiles áreas en las que seguir investigando. Pero, en general, era sólido: el universo estaba compuesto por unos dos tercios de energía oscura (un algo misterioso que hace que el cosmos se expanda aceleradamente), quizás un cuarto de materia oscura (otro algo misterioso que determina la evolución de su estructura) y un 4 o 5 por ciento de materia «ordinaria» (de la que estamos hechos nosotros, los planetas, las estrellas, las galaxias y todo lo que pensábamos que existía hasta hace unas décadas). Todo cuadraba. Pero no corramos tanto. O, mejor dicho, no corramos demasiado.

En los últimos años ha surgido una discrepancia entre dos maneras de medir el ritmo al que se expande el universo, dado por la llamada constante de Hubble (H_0). Las mediciones que parten del universo actual y retroceden hacia fases más y más tempranas de su evolución han arrojado sistemáticamente un valor de H_0. Y las que van desde el universo primitivo hacia el presente han hallado otro valor, que sugiere que el cosmos se expande más despacio de lo que pensábamos.

La discrepancia es matemáticamente sutil, pero cobra importancia a nivel cósmico. Conocer el valor de la constante de Hubble ayuda a los cosmólogos a extrapolar la evolución del universo hacia atrás en el tiempo para determinar su edad. También les permite extrapolarla hacia el futuro para predecir en qué momento (de acuerdo con la teoría actual) la distancia entre las galaxias se habrá hecho tan enorme que el cosmos parecerá vacío más allá de nuestro entorno inmediato. El valor correcto de H_0 podría incluso ayudar a dilucidar la naturaleza de la energía oscura que acelera la expansión.

Este tipo de desacuerdos son frecuentes en la ciencia y generalmente desaparecen al realizar estudios más detallados. Los científicos confiaban en que este también se resolvería, y eso los ha tranquilizado durante el último decenio. Pero la discrepancia en torno al valor de H_0 no ha hecho más que aumentar, tornándose más peliaguda año tras año, con cada nueva medida. Ahora todo el mundo coincide en que existe un problema.

Nadie está diciendo que todo el modelo cosmológico estándar sea incorrecto. Pero tiene que haber algo incorrecto, tal vez en las observaciones o en su interpretación, aunque ninguno de estos dos escenarios resulta demasiado verosímil. Eso nos deja una última opción, igual de improbable pero cada vez menos inconcebible: que haya algún problema con el propio modelo cosmológico.

EN BUSCA DE DOS NÚMEROS

Durante gran parte de la historia, el estudio de nuestros orígenes cósmicos se circunscribió a los mitos: variaciones sobre el tema «En el principio...». Pero, en 1925, el astrónomo estadounidense Edwin Hubble lo convirtió en una cuestión empírica, al anunciar que había resuelto el viejo problema de la naturaleza de las «nebulosas». ¿Acaso estas manchas celestes eran formaciones gaseosas contenidas en el manto de estrellas de nuestra galaxia? De ser así, quizá dichas estrellas constituyesen todo el universo. Pero las nebulosas también podían ser «universos isla» independientes, y Hubble descubrió que al menos una lo era: la que hoy conocemos como galaxia de Andrómeda.

Además, al estudiar la luz de otras nebulosas, Hubble halló que sus longitudes de onda estaban desplazadas hacia el extremo rojo del espectro visible, lo cual indicaba que esos objetos se estaban alejando de la Tierra. (La velocidad de la luz permanece constante; lo que cambia es la longitud de onda, que es la que determina el color.) En 1927, el físico y sacerdote belga Georges Lemaître detectó una pauta: cuanto más lejos estaba la galaxia, mayor era el desplazamiento al rojo de su espectro. Es decir, que cuanto más distantes eran las galaxias, más rápido se alejaban. En 1929, Hubble llegó de manera independiente a la misma conclusión: el universo se estaba expandiendo.

EN SÍNTESIS

Los astrónomos han calculado en repetidas ocasiones el ritmo actual de expansión del universo (la constante de Hubble) por medio de dos técnicas diferentes. Estas mediciones han generado un conflicto aparentemente irresoluble.

Uno de los métodos se basa en medir supernovas y estrellas en el universo reciente y el otro emplea la luz emitida poco después de la gran explosión. Ambos arrojan valores distintos para la constante de Hubble.

La discrepancia quizá se deba a problemas experimentales, aunque nadie está seguro de cuáles podrían ser. Otra posibilidad es que el conflicto apunte a la existencia de fenómenos desconocidos, es decir, de nueva física.

Pero ¿a partir de qué se expandía? Si invertimos la expansión del universo, acabamos llegando a un punto inicial, una especie de nacimiento cósmico. Casi de inmediato, varios teóricos sugirieron algún tipo de explosión del espacio y el tiempo, un fenómeno que más tarde recibiría —al principio de forma despectiva— el sobrenombre de «gran explosión» (*big bang*). La idea sonaba fantasiosa y, en ausencia de una base empírica, la mayoría de los astrónomos la ignoraron durante varios decenios. Todo cambió en 1965, con dos artículos que aparecieron simultáneamente en la revista *The Astrophysical Journal*. El primero, escrito por cuatro físicos de la Universidad de Princeton, predecía la temperatura actual de un universo que hubiera surgido de una explosión primordial. El segundo, a cargo de dos astrónomos de los Laboratorios Bell, comunicaba la medición de esa temperatura.

La antena de radio de los Laboratorios Bell registró radiación procedente de todas las direcciones del cielo, que acabaría siendo conocida como el fondo cósmico de microondas (CMB, por sus siglas en inglés). La temperatura derivada a partir de esa radiación, 3 kelvin, no coincidía exactamente con la predicción del grupo de Princeton. Pero se acercaba lo bastante como para generar rápidamente un consenso: constituía una prueba de la gran explosión. En 1970 Allan Sandage, antiguo estudiante de Hubble, publicó un artículo muy influyente en *Physics Today,* el cual, en la práctica, estableció el programa de investigación que seguiría la nueva ciencia cosmológica en los decenios posteriores. Se titulaba «Cosmología: la búsqueda de dos números». Según Sandage, uno de esos números era el ritmo actual de expansión del universo (la constante de Hubble). El otro era el ritmo al que se frenaba dicha expansión, el llamado parámetro de deceleración.

> **Nadie dice que el modelo cosmológico estándar sea incorrecto. Pero tiene que haber algo incorrecto**

UNA CRISIS CÓSMICA

Los científicos consiguieron determinar antes el valor del segundo parámetro. A finales de la década de 1980, dos equipos se dispusieron a medir la deceleración del universo, usando una hipótesis habitual y una herramienta común. La hipótesis era que la expansión de un universo lleno de materia que interaccionaba gravitatoriamente (atrayendo a todo el resto de materia) debía estar frenándose. La herramienta eran las supernovas de tipo Ia, explosiones estelares que los astrónomos consideran candelas estándar.

Las candelas estándar son fuentes de luz cuya luminosidad absoluta no varía de uno a otro objeto, de manera que su brillo aparente permite calcular a qué distancia relativa se encuentran. Podemos entenderlo mejor si pensamos en una bombilla de 60 vatios. A medida que nos alejamos de ella, nos parecerá más y más tenue, pero si sabemos que su potencia es de 60 vatios (el análogo de la luminosidad absoluta) podremos deducir a qué distancia estamos de ella a partir del brillo que vemos.

Los astrónomos razonaron que una supernova remota con un determinado desplazamiento al rojo parecería más cercana, y por lo tanto más brillante, en un universo que se está frenando que en uno que se expandiese a un ritmo constante. Sin embargo, lo que ambos grupos hallaron de manera independiente fue que las supernovas distantes eran más tenues de lo esperado, de modo que se encontraban más lejos. En 1998 anunciaron su conclusión: la expansión del universo no se está frenando, sino acelerando. La causa de esta aceleración se conoce como energía oscura, un nombre genérico que denota que nadie sabe aún lo que es realmente.

El valor del primer número de Sandage, la constante de Hubble, no se hizo esperar. El ritmo actual de expansión del universo llevaba decenios siendo objeto de debate entre los astrónomos. El mismo Sandage había afirmado que H_0 sería del orden de 50 (en unidades de kilómetros por segundo por 3,26 millones de años luz, las cuales asumiremos implícitamente a partir de ahora), lo que implicaba que el universo tendría unos 20.000 millones de años. Otros astrónomos se decantaban por un valor de H_0 cercano a 100, o lo que es lo mismo, una edad del universo de unos 10.000 millones de años. Esta discrepancia resultaba embarazosa: cualquier ciencia —aun una nueva, como era en esos momentos la cosmología— debería poder determinar de manera más precisa una cantidad tan fundamental.

En 2001, el Key Project (Proyecto clave) del telescopio espacial Hubble realizó la primera medida fiable de la constante de Hubble. Como candelas estándar se usaron las variables cefeidas, estrellas cuyo brillo varía con una regularidad que está relacionada con su luminosidad absoluta, y el valor de H_0 resultante se situó entre los dos mencionados anteriormente: 72 ± 8.

La siguiente medición puramente astronómica de la constante de Hubble la llevó a cabo la colaboración SH0ES, liderada por Adam G. Riess, quien en 2011 compartiría el premio Nobel de física por su papel en el descubrimiento de la expansión acelerada. Esta vez las candelas estandar, además de variables cefeidas, incluían supernovas de tipo Ia, entre ellas algunas de las más lejanas jamás observadas. En 2005, los resultados iniciales de SH0ES indicaban un valor de 73 ± 4 para H_0, casi idéntico al obtenido por el Key Project, pero con un margen de error más pequeño. Desde entonces SH0ES ha ido publicando actualizaciones regulares, todas ellas compatibles con el valor original y con incertidumbres cada vez menores. El resultado más reciente, de 2019, es de 74,03 ± 1,42.

Todas estas mediciones de H_0 se basan en el enfoque astronómico tradicional: empezar aquí y ahora, en lo que los cosmólogos denominan el universo tardío, y mirar más y más lejos en el espacio (lo cual implica remontarse cada vez más atrás en el tiempo, dado que la velocidad de la luz es finita), hasta donde permitan los instrumentos. Pero en las últimas dos décadas los investigadores han comenzado a emplear la estrategia opuesta: partir del punto más lejano que pueden observar y avanzar hacia el presente. Ese punto límite —el telón que separa lo que podemos ver y lo que no, el universo tardío del temprano— lo marca el mismo CMB que se descubrió en los años sesenta con la antena de radio de los Laboratorios Bell.

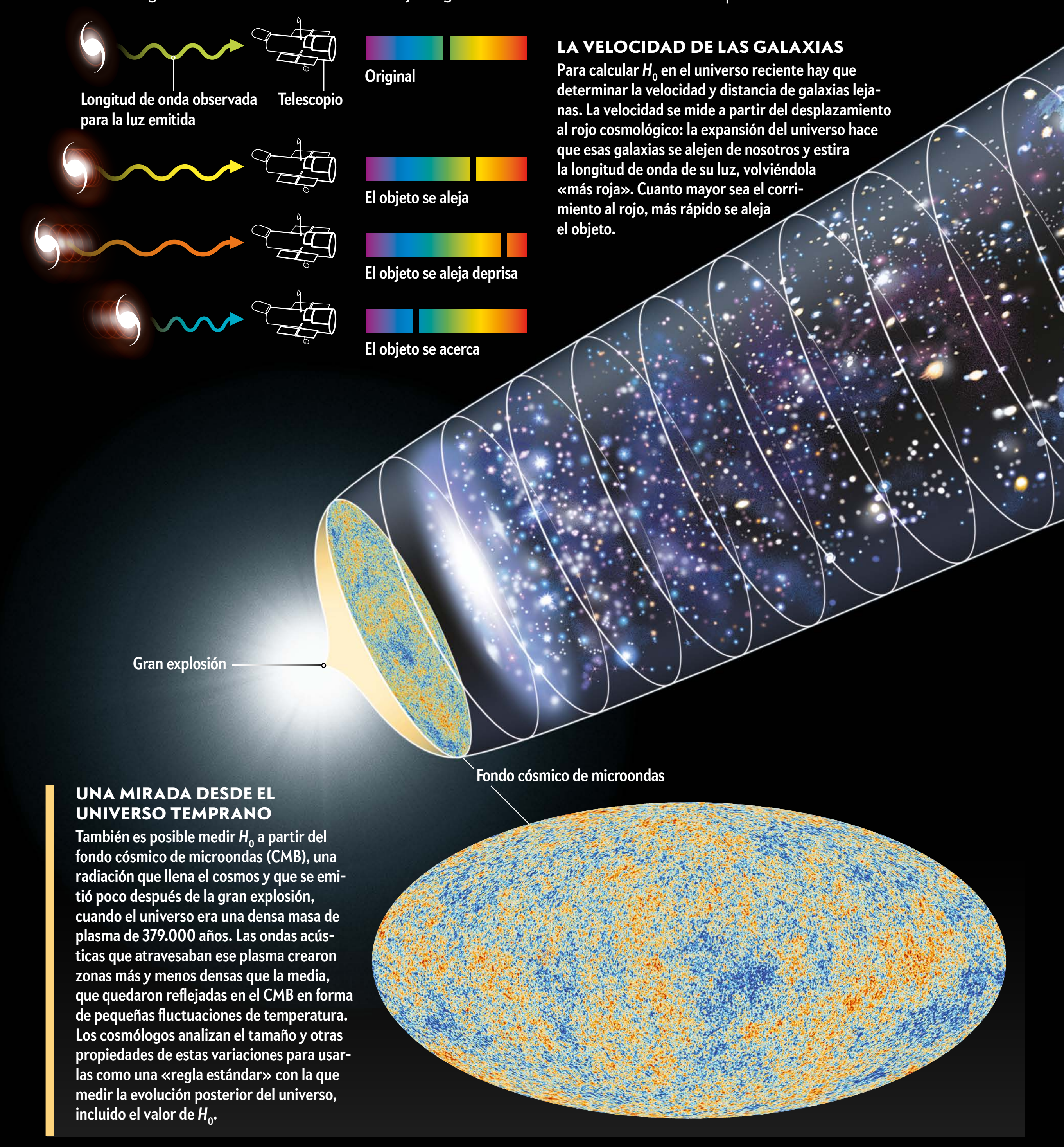
El CMB es una reliquia del período en que el universo, a la tierna edad de unos 379.000 años, se había enfriado lo bastante como para que se formasen los primeros átomos de hidrógeno. Eso disipó la densa sopa de protones y electrones libres que existía hasta ese momento, permitiendo que los fotones que forman la radiación del CMB se propagaran por el universo. Aunque los primeros datos mostraban un CMB homogéneo, los teóricos confiaban en que a mayor resolución aparecerían pequeñas variaciones de temperatura, las cuales estarían relacionadas con las semillas de materia a partir de las que se formaron las grandes estructuras del universo: galaxias, y cúmulos y supercúmulos de galaxias.

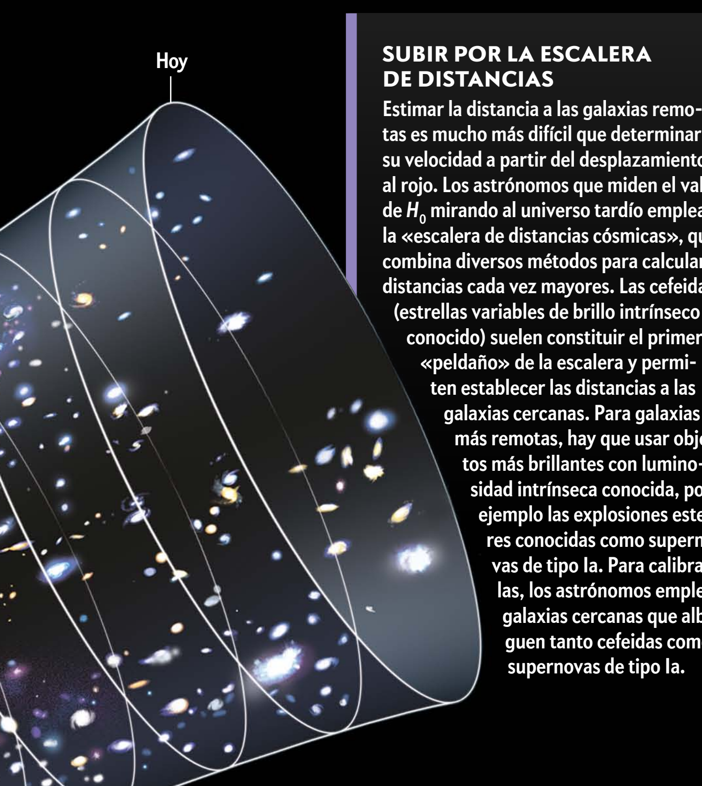
En 1992, el satélite COBE de la NASA (el primer observatorio espacial del CMB) encontró esas variaciones. En 2003, la son-

Continúa en la página 26

Un conflicto en el corazón de la cosmología

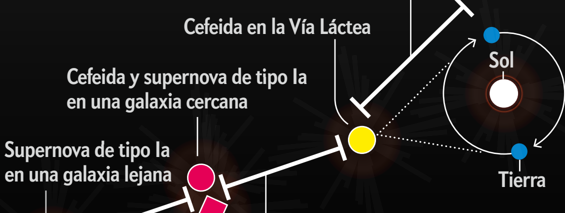
La constante de Hubble (H_0), que mide el ritmo al que se expande hoy en día el universo, es una cantidad esencial y controvertida para la cosmología. Sorprendentemente, los cálculos de H_0 basados en el universo temprano (inmediatamente posterior a la gran explosión) y en el universo tardío (más cercano al momento presente) no coinciden. El desacuerdo podría deberse a errores en alguna de las dos mediciones o reflejar lagunas fundamentales en nuestra comprensión del cosmos.

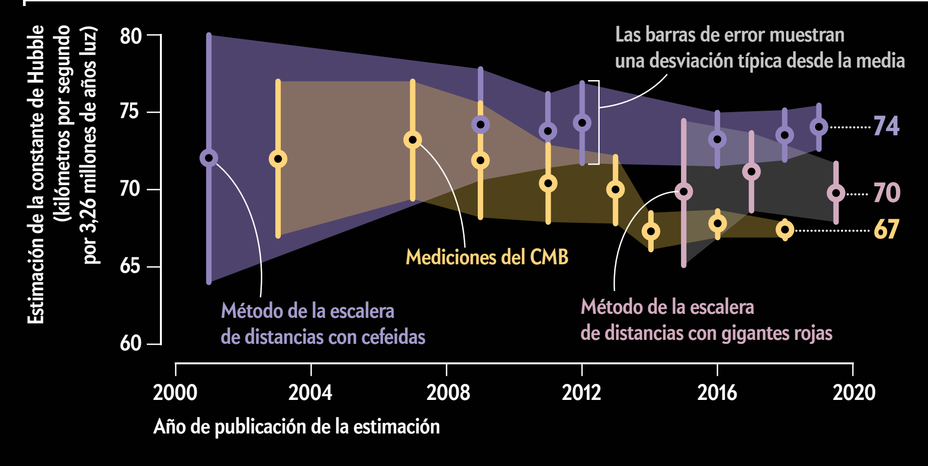




SUBIR POR LA ESCALERA DE DISTANCIAS

Estimar la distancia a las galaxias remotas es mucho más difícil que determinar su velocidad a partir del desplazamiento al rojo. Los astrónomos que miden el valor de H_0 mirando al universo tardío emplean la «escalera de distancias cósmicas», que combina diversos métodos para calcular distancias cada vez mayores. Las cefeidas (estrellas variables de brillo intrínseco conocido) suelen constituir el primer «peldaño» de la escalera y permiten establecer las distancias a las galaxias cercanas. Para galaxias más remotas, hay que usar objetos más brillantes con luminosidad intrínseca conocida, por ejemplo las explosiones estelares conocidas como supernovas de tipo Ia. Para calibrarlas, los astrónomos emplean galaxias cercanas que alberguen tanto cefeidas como supernovas de tipo Ia.



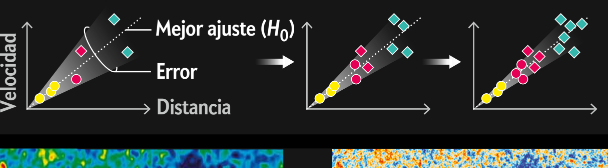


RESULTADOS DISCORDANTES

Las mediciones basadas en el CMB dan una H_0 de 67 (en unidades de kilómetros por segundo y por 3,26 millones de años luz). El valor obtenido en el universo tardío usando cefeidas es de 74. Una nueva alternativa a las cefeidas —gigantes rojas que fulguran con un brillo intrínseco conocido— no ha hecho sino aumentar la tensión: arroja un valor de H_0 en torno a 70, intermedio entre los otros dos e incompatible con ellos (los márgenes de error no coinciden).

Cómo se obtienen valores cada vez más precisos de la constante de Hubble

Método de la escalera de distancias: principalmente, realizando más medidas



Método del CMB: principalmente, realizando medidas más precisas

Satélite WMAP

Satélite Planck

UN MEJOR ACUERDO O NUEVA FÍSICA

Astrónomos y cosmólogos tratan de ir mejorando la precisión de sus respectivos cálculos de H_0 (reduciendo incertidumbres y posibles errores), con la esperanza de que sus resultados acaben siendo compatibles. Los grandes telescopios escudriñan el cielo para medir cefeidas cada vez más distantes de la Tierra, y el mapa del CMB obtenido por el satélite Planck ha mejorado drásticamente las medidas de su predecesor, la sonda WMAP. Pero si perdura la discrepancia, puede que haya que revisar en profundidad nuestros modelos cosmológicos.

ESA Y PLANCK (*mapa del CMB de Planck*); NASA Y EQUIPO CIENTÍFICO DE WMAP (*mapa del CMB de WMAP*); FUENTE: «THE CARNEGIE-CHICAGO HUBBLE PROGRAM. VIII. AN INDEPENDENT DETERMINATION OF THE HUBBLE CONSTANT BASED ON THE TIP OF THE RED GIANT BRANCH», POR WENDY L. FREEDMAN ET AL. EN *THE ASTROPHYSICAL JOURNAL*, VOL. 882, N.º 1, ART. 34, SEPTIEMBRE DE 2019 (*estimaciones de H_0*); GEORGE RETSECK (*cono de expansión*); JEN CHRISTIANSEN (*esquemas*)

Viene de la página 23
da WMAP proporcionó mayor resolución, suficiente para que los físicos determinaran el tamaño típico de las manchas del CMB. Ese tamaño está relacionado con el de las ondas acústicas generadas por la materia primigenia en el plasma de protones y electrones [*véase* «La sinfonía cósmica», por Wayne Hu y Martin White. Investigación y Ciencia, abril de 2004], que se puede calcular sabiendo que dichas ondas viajaron a una fracción considerable de la velocidad de la luz durante unos 379.000 años. Dado que las zonas más y menos densas asociadas a las manchas del CMB evolucionaron para dar lugar al cosmos que vemos hoy, los cosmólogos pueden usar ese tamaño inicial como una «regla estándar» con la que medir el crecimiento de la estructura a gran escala hasta el momento presente. Y esos estudios revelan el ritmo actual de la expansión, es decir, la constante de Hubble.

La primera determinación de H_0 que hizo WMAP en 2003 dio como resultado 72 ± 5. Fantástico: ese valor cuadraba perfectamente con el obtenido por el Key Project, con la ventaja añadida de que el margen de error era menor. Los resultados posteriores de WMAP fueron ligeramente menores: 73 en 2007, 72 en 2009 y 70 en 2011. Esto no representaba un problema, ya que los errores de SH0ES y WMAP seguían solapándose en el intervalo entre 72 y 73.

Si los cosmólogos no encuentran la causa de la «tensión de Hubble» en las observaciones del universo tardío ni en las del temprano, no tendrán más remedio que considerar la tercera opción: nueva física

Para 2013, sin embargo, los intervalos de error de ambos experimentos apenas se tocaban. Los datos más recientes de SH0ES mostraban una constante de Hubble de 74 ± 2, mientras que los resultados finales de WMAP arrojaban un valor de 70 ± 2. Aun así, la cosa no era preocupante, puesto que un valor de 72 estaría de acuerdo con ambos métodos. Seguramente uno de los resultados se iría aproximando al otro a medida que la tecnología y los métodos mejorasen. Incluso era posible que eso ocurriese tan pronto como se publicaran los primeros resultados del satélite Planck, el proyecto de la Agencia Espacial Europea que sucedió a WMAP.

Esos resultados llegaron en 2014 y reflejaron un valor de la constante de Hubble de 67,4 ± 1,4. Los intervalos de error ya no coincidían ni remotamente, y los datos posteriores de Planck se han mostrado tan inflexibles como los de SH0ES. El valor obtenido por Planck se ha mantenido en 67 y el margen de error se ha reducido primero a 1 y, en 2018, a una fracción de la unidad.

El término científico que describe una situación así es «tensión», como ilustra el título de un congreso organizado el verano pasado en el Instituto Kavli de Física Teórica (KITP), en California: «Tensiones entre el universo temprano y el tardío». El primer ponente fue Riess, que al final de su charla se dirigió a otro nóbel presente en la audiencia (David Gross, físico de partículas y exdirector del KITP) y le preguntó: «Qué tenemos, una tensión o un problema?».

Gross señaló que esas distinciones eran «arbitrarias», para acabar admitiendo: «Pero sí, supongo que podemos decir que es un problema». Veinte minutos después, al final de la sesión de preguntas, corrigió su afirmación. En física de partículas «no lo llamaríamos una tensión, sino más bien una crisis», precisó. «Muy bien», respondió Riess para cerrar el debate. «Entonces estamos todos en crisis.»

EL ORIGEN DE LA TENSIÓN

A diferencia de una tensión (que necesita ser resuelta) o un problema (que requiere una solución), una crisis exige algo más: una revisión general. Pero ¿de qué? Los investigadores que estudian la constante de Hubble contemplan tres opciones.

Una es que haya algo incorrecto en las investigaciones del universo tardío. La fiabilidad de una «escalera de distancias cósmicas» que se extiende hasta los confines del universo se basa en la de sus peldaños, las candelas estándar. Y, como en cualquier observación científica, hay que tener en cuenta los errores sistemáticos.

Esta posibilidad sobrevoló el congreso del KITP. En mitad del encuentro, un equipo dirigido por Wendy L. Freedman, astrofísica de la Universidad de Chicago y antigua investigadora principal del Key Project, publicó un artículo inconformista en el repositorio arXiv. Los autores usaron otro tipo de candelas estándar: estrellas gigantes rojas que, cuando están a punto de morir, experimentan un «fogonazo de helio» que indica de manera fiable su luminosidad. Freedman y sus colaboradores obtuvieron un valor que, como expresaban en su artículo, «se sitúa en la mitad del intervalo definido por la presente tensión de Hubble»: 69,8 ± 0,8. El margen de error de este resultado no se superponía ni con el de SH0ES ni con el de Planck, así que los científicos no tenían nada a lo que agarrarse.

A algunos de los investigadores del universo tardío que asistían al congreso del KITP les pareció que publicar el artículo en ese momento era un tanto provocador. En concreto, el equipo de SH0ES no tuvo tiempo de digerir los datos —aunque lo intentaron esa noche durante la cena—, y mucho menos de elaborar una respuesta.

Sin embargo, tan solo tres semanas más tarde replicaron mediante otro artículo. Los autores comenzaban de manera diplomática, afirmando que el método del equipo de Freedman hacía uso de «una candela estándar prometedora para medir distancias extragalácticas». Pero a continuación enumeraban los errores sistemáticos que, a su juicio, afectaban al resultado. Riess y su equipo reinterpretaron los datos de las gigantes rojas y hallaron un valor de la constante de Hubble mucho más parecido a los anteriores, 72,4 ± 1,9.

Freedman disiente vehementemente de esta interpretación: «¡Está mal! ¡Completamente mal!», proclama. Y añade que «no han entendido el método, aunque se lo hemos explicado en varias ocasiones».

A principios de octubre de 2019, en otro congreso sobre esta «tensión de Hubble», la disputa pasó al plano personal cuando Barry Madore (uno de los colaboradores de Freedman, además de su pareja) mostró una diapositiva en la que se veía la cabeza de Riess en una guillotina. La imagen formaba parte de una metáfora científica y Madore afirmó que incluir la cabeza de Riess había sido una broma. Pero Riess estaba entre el público. Baste decir que, a instancias de muchos participantes, en el siguiente receso se produjo una discusión sobre códigos deontológicos.

Debido a estas controversias, los físicos de partículas tienen la sensación de que, efectivamente, el problema es de los astrónomos y de los errores inherentes al método de la escalera de

distancias. En principio, las observaciones basadas en el CMB también podrían verse afectadas por errores sistemáticos. Pero hay pocos astrónomos (si es que hay alguno) que piensen que el problema radica en los resultados de Planck, que podría haber alcanzado el límite de precisión para las observaciones espaciales del CMB. En otras palabras, los físicos creen que las medidas de Planck son probablemente las mejores que van a tener nunca. «Los datos son espectaculares», confirma Nicholas Suntzeff, astrónomo de la Universidad A&M de Texas que ha colaborado tanto con Freedman como con Riess, aunque no en el tema de la constante de Hubble. Y añade que «otras observaciones independientes» del CMB (realizadas con el Telescopio del Polo Sur y el Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama) «demuestran que no hay errores».

Si los cosmólogos no logran encontrar la causa de la tensión de Hubble en las observaciones del universo tardío ni en las del temprano, no tendrán más remedio que considerar la tercera opción: nueva física.

¿Y AHORA QUÉ?

Los científicos llevan casi un siglo hablando de nueva física: fuerzas o fenómenos más allá de nuestra comprensión actual del universo. Un decenio después de que Albert Einstein formulara su teoría general de la relatividad (publicada en 1915), el advenimiento de la mecánica cuántica puso en peligro su completitud. El universo de lo muy grande (que opera de acuerdo a las reglas de la relatividad general) demostró ser matemáticamente incompatible con el universo de lo muy pequeño (que obedece las reglas de la mecánica cuántica).

Durante un tiempo los físicos pudieron ignorar el problema, dado que ambos dominios no se solapaban en la práctica. Pero entonces llegó el descubrimiento del CMB, que confirmó la idea de que el universo de lo muy grande surgió a partir del universo de lo muy pequeño. Es decir, que las galaxias y cúmulos de galaxias que estudiamos con la ayuda de la relatividad general se formaron a partir de fluctuaciones cuánticas. La tensión de Hubble aparece al intentar conectar estos dos tipos de física. Las fluctuaciones cuánticas reflejadas en el CMB predicen que el universo envejecerá con un determinado valor de la constante de Hubble, mientras que las observaciones actuales basadas en la relatividad general apuntan a otro valor.

Riess compara esta discrepancia con el crecimiento de una persona: «Podemos medir la altura de un niño de manera muy precisa cuando tiene dos años y usar nuestros conocimientos sobre cómo crecen las personas (por ejemplo, curvas de crecimiento) para predecir la altura que tendrá de adulto». Si todo fuera ideal, la predicción y la medición coincidirían. «Pero eso no es lo que ocurre en este caso», señala Riess, y añade que «tampoco disponemos de curvas de crecimiento para universos».

Así que los cosmólogos han comenzado a contemplar una opción más radical, aunque no del todo inaceptable: que el modelo cosmológico estándar no sea tan completo como suponían.

Un factor que podría influir en nuestra comprensión de la evolución del universo es la incertidumbre en el censo de partículas del cosmos. La mayoría de los científicos tienen edad suficiente para recordar otra discrepancia entre teoría y observaciones: el problema de los neutrinos solares, una disputa acerca de los neutrinos electrónicos procedentes del Sol que se alargó durante decenios. Los físicos teóricos predecían una cantidad y los detectores indicaban otra. Los físicos sospechaban que había errores sistemáticos en las observaciones y los astrónomos cuestionaban la completitud de la teoría. Como en el caso de la tensión de Hubble, nadie daba su brazo a torcer, hasta que al final del milenio se descubrió que los neutrinos tienen masa, lo que obligó a los teóricos a realizar ajustes en el modelo estándar de la física de partículas. Un ajuste similar —por ejemplo, una nueva variedad de neutrinos en el universo temprano— podría alterar la distribución de masa y energía lo suficiente como para explicar las diferencias en las estimaciones de la constante de Hubble.

Otra posible explicación es que el efecto de la energía oscura cambie con el tiempo. Y es una opción razonable, dado que los cosmólogos no saben qué es ni cómo actúa esta componente.

De acuerdo con Suntzeff, «se necesita una pequeña corrección en algún sitio para que cuadren los números. Esto entraña nueva física, y eso es lo que entusiasma a los cosmólogos: una fisura en el modelo estándar de la física de partículas, algo nuevo en lo que trabajar».

Todo el mundo sabe lo que tiene que hacer ahora. Los astrónomos observacionales esperarán los datos de Gaia, un observatorio de la Agencia Espacial Europea que en el próximo par de años medirá las distancias a más de 1000 millones de estrellas de nuestra galaxia con una precisión sin precedentes [*véase* «El primer mapa 3D de la Vía Láctea», por Carme Jordi y Eduard Masana. Investigación y Ciencia, marzo de 2019]. Si estas mediciones no coincidieran con los valores que los astrónomos han venido usando como primer peldaño en la escalera de distancias, el problema podría deberse, después de todo, a los errores sistemáticos. Los teóricos, por su parte, continuarán generando interpretaciones alternativas del universo, aunque hasta ahora no han encontrado ninguna que haya superado el escrutinio de la comunidad científica. Por el momento, a no ser que se produzca algún avance inesperado, la tensión (o problema, o crisis) de Hubble seguirá reflejando un universo donde una predicción de 67 para la constante de Hubble se ve desmentida por un valor observado de 74.

No obstante, el modelo cosmológico estándar sigue siendo uno de los grandes éxitos científicos de nuestro tiempo. En medio siglo, la cosmología ha pasado de la especulación a (casi) la certeza. Puede que no sea tan completo como pensaban los cosmólogos hace solamente un año, pero constituye un ejemplo paradigmático de cómo ha de funcionar la ciencia: planteando preguntas, proporcionando respuestas y señalando misterios. IyC

PARA SABER MÁS

Planck 2018 results. VI. Cosmological parameters. Colaboración Planck, julio de 2018. Disponible en **arxiv.org/abs/1807.06209**.

Large Magellanic Cloud Cepheid standards provide a 1% foundation for the determination of the Hubble constant and stronger evidence for physics beyond ΛCDM. Adam G. Riess et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 876, n.º 1, art. 85, mayo de 2019.

The Carnegie-Chicago Hubble Program. VIII. An independent determination of the Hubble constant based on the tip of the red giant branch. Wendy L. Freedman et al. en *The Astrophysical Journal*, vol. 882, n.º 1, art. 34, septiembre de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

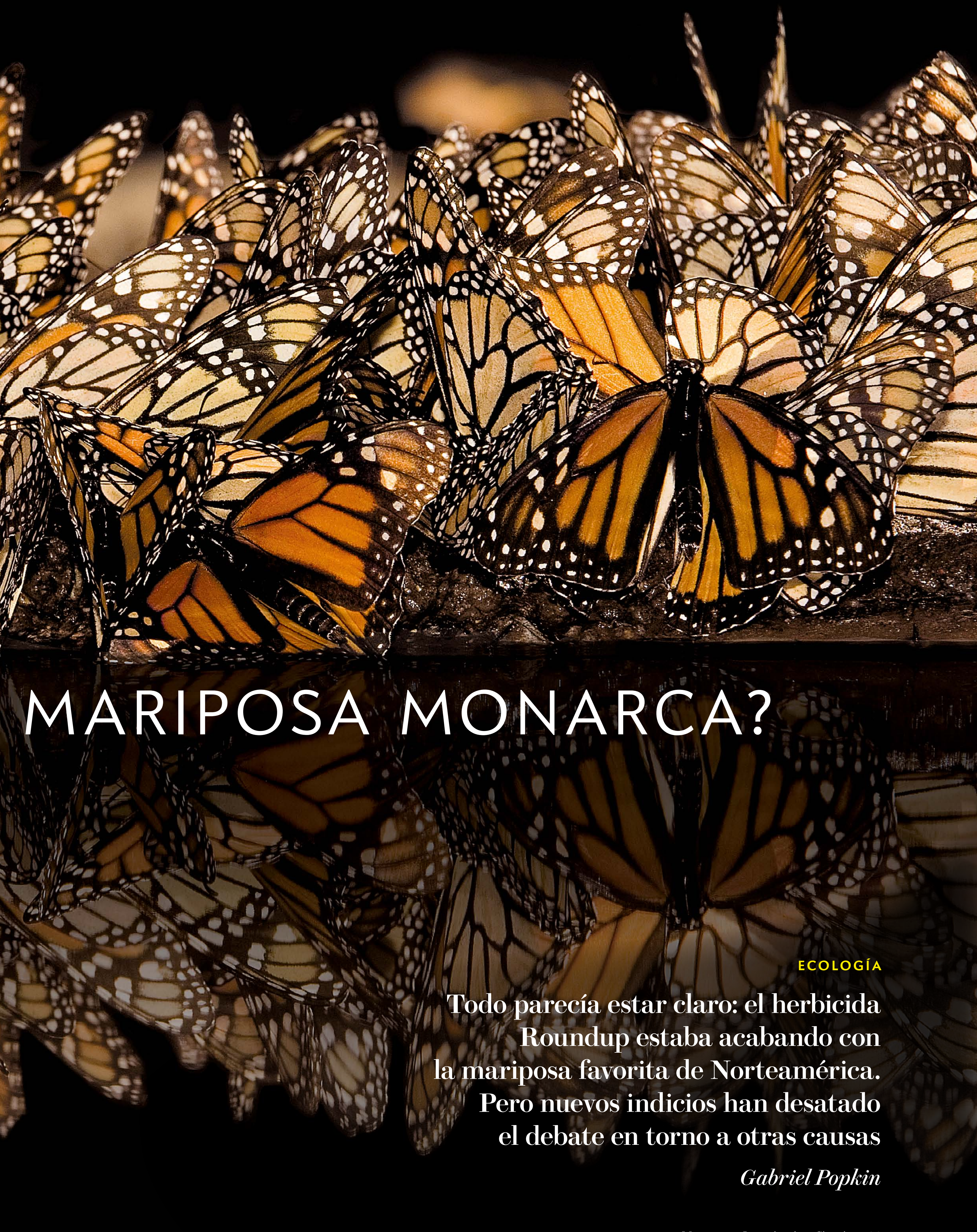
La constante de Hubble y el universo en expansión. Wendy Freedman en *IyC*, junio de 2004.

El rompecabezas de la energía oscura. Adam G. Riess y Mario Livio en *IyC*, mayo de 2016.

El problema de la constante de Hubble. Dominik J. Schwarz en *IyC*, marzo de 2019.



¿QUÉ ESTÁ MATANDO A LA



MARIPOSA MONARCA?

ECOLOGÍA

Todo parecía estar claro: el herbicida Roundup estaba acabando con la mariposa favorita de Norteamérica. Pero nuevos indicios han desatado el debate en torno a otras causas

Gabriel Popkin

Gabriel Popkin es escritor científico. Físico de formación, cubre temas muy variados y colabora con diversas publicaciones, entre ellas *Nature* y *Science*.



Karen Oberhauser comenzó a temer por el porvenir de la mariposa monarca a raíz de su ascenso a una montaña situada a cien kilómetros de Ciudad de México. En invierno de 1996-1997, esta ecóloga de la Universidad de Minnesota subía por ella resollando y con dolor de cabeza, como todo aquel no habituado a las grandes alturas. Pero el esfuerzo mereció la pena: cuando se detuvo y miró en derredor, contempló millones de mariposas, colgadas como joyas vivientes de los abetos que cubrían las laderas.

Casi toda la población mundial de monarca se hacinaba allí y en los bosques cercanos, en una extensión de apenas 18 hectáreas. Otros entomólogos conocían el lugar, pero para Oberhauser era la primera visita. Pensó que una tormenta violenta o una banda de leñadores furtivos podían borrar del mapa aquel lugar. «Me di cuenta de lo vulnerables que eran», recuerda.

Ese bosque es el punto de partida de una extraordinaria migración anual que lleva a esta mariposa hasta el lejano Canadá, en verano, y de vuelta a México, en invierno. A lo largo del trayecto se multiplica y se alimenta en los campos de cultivo del Medio Oeste de EE.UU., el lugar de procedencia de Oberhauser. Durante los años posteriores a su visita al bosque mexicano, nuestra protagonista comenzó a sospechar que su región se había convertido en un lugar hostil para el lepidóptero. Los agricultores estaban fumigando los campos de soja y maíz con el herbicida Roundup para erradicar las malas hierbas. Pero el producto también destruye una planta indispensable para la mariposa, pues sobre ella hacen su puesta las hembras y sirve como único alimento a las larvas: el algodoncillo (género *Asclepias*). Con sus colaboradores, comenzó a censar las plantas y los huevos. Llegó a la conclusión de que la escasez del algodoncillo en los campos de cultivo significaba menos huevos y menos adultos que regresaban a México. En 2012 publicó un artículo con otros autores donde daba a conocer esta «hipótesis del algodoncillo» y su implicación alarmante: el Roundup estaba poniendo en peligro la gran migración de la monarca.

La gente y numerosos especialistas en esta mariposa quedaron impactados por la idea. Era lógico: al mismo tiempo que esa fuente primordial de alimento desaparecía, la población de la mariposa en México se desmoronaba. Aquel invierno en que Oberhauser visitó el refugio mexicano, había unos 300 millones de mariposas; una década después no alcanzaban los cien. A juicio de ella y de otros, el remedio sería repoblar con algodoncillos para reponer las pérdidas. Miles de ciudadanos concienciados respondieron a la llamada. Michelle Obama los plantó en un jardín de la Casa Blanca. Los grupos ecologistas pidieron al Servicio de Fauna y Pesca de EE.UU. que catalogase a la monarca (*Danaus plexippus plexippus*) como una especie amenazada, para reforzar la protección de su hábitat.

Desde entonces, empero, han surgido discrepancias al respecto. Los censos hechos en EE.UU., tanto durante como después de la época de cría estival, no indican un declive continuo, aunque en México su número se desplome. Y una proporción importante de las mariposas mexicanas procede de regiones de EE.UU. donde no abundan los campos fumigados con Roundup, apuntan otros datos. Los especialistas escépticos afirmaron que los insectos se multiplicaban sin problemas en las latitudes altas pero algo estaba acabando con ellas en su camino a México. «La migración es una suerte de maratón», explica Andrew Davis, ecólogo en la Universidad de Georgia. «Si en la salida el número de corredores no ha cambiado mucho en veinte años, pero son menos los que llegan a la meta, uno no diría que la participación va a la baja. Pensaría que algo sucede durante la carrera.»

La identidad de ese algo sigue siendo un misterio tan esquivo como preocupante. Algunos datos señalan a la pérdida de las plantas nectaríferas de las que el adulto se alimenta durante el viaje al sur y a la degradación de los vitales bosques situados al final de la ruta migratoria. También especulan con que una infección parasitaria podría estar diezmando a las migrantes. (Una pequeña población que inverna en la costa de California ha sufrido hace poco un desplome. Los entomólogos están preocupados, pero su hábitat no coincide con el de la población oriental, por lo que creen que las causas probablemente serán distintas.)

EN SÍNTESIS

Cuando el herbicida Roundup acababa con los algodoncillos de los campos de cultivo norteamericanos a inicios de este siglo, los expertos lo culparon del drástico descenso de las poblaciones de la mariposa monarca.

Pero desde entonces han surgido otros posibles responsables, como las alteraciones de los bosques situados en el extremo sur de su migración anual.

Ahora, preocupados por esta apreciada mariposa, debaten en torno a la amenaza real y el modo de conjurarla.

PÁGINAS ANTERIORES: INGO ARNDT, NATURE PICTURE LIBRARY

Casi todos coinciden en que, en general, pese a los altos y bajos que se suceden de un año a otro, la población invernal de México ha menguado durante los tres últimos decenios. No es una buena noticia para nuestra mariposa. Qué hacer al respecto dependerá de la causa. Oberhauser y sus partidarios siguen manteniendo que la principal culpable es la desaparición del algodoncillo. Pero las otras pruebas enturbian el asunto e imprimen giros enrevesados a lo que parecía un relato sencillo, con un villano claro. Eso también significa que ayudar a este lepidóptero se ha vuelto más complicado.

NORTE POR SUR

La primera crónica fidedigna de la migración en masa de la monarca data de 1857, cuando un naturalista describió su aparición en el valle del Misisipi en «tan vasto número que los enjambres oscurecían el cielo».

Con los años, los biólogos descubrieron que cuando la primavera llegaba al valle, como en otras partes de Norteamérica, las hembras se posan en más de 70 especies de algodoncillos para nutrirse y poner los huevos. Cada hembra pone hasta medio millar, tras lo cual, muere. De ellos nacen las orugas, que a su vez se transforman en mariposas; el ciclo se repite así cuatro o cinco veces cada año.

Las monarcas que pasan el invierno en México vuelan al norte y hacen su puesta cerca de la frontera de Texas, en primavera. Su descendencia vive de dos a seis semanas y engendra las generaciones que migran hasta el Medio Oeste y el Sur de EE.UU. hasta concluir su viaje en los estados de los Grandes Lagos, en Nueva Inglaterra y en Canadá. Conforme los días se acortan con la llegada del otoño, nace la última generación, apodada «supergeneración». Estos insectos viven hasta ocho meses porque su metabolismo se ralentiza y no invierten esfuerzos preciosos en la procreación. En lugar de ello viajan al sur, desde latitudes septentrionales hasta México, a un ritmo de hasta 160 kilómetros diarios. En diciembre, las que han sobrevivido al viaje se hacinan en abetos oyameles (*Abies religiosa*). Descansan allí hasta la primavera, momento en que emprenden el vuelo hacia el norte, en una odisea que acabarán sus descendientes.

Después de una larga búsqueda, a finales de los años 70 los biólogos descubrieron los diminutos bosques de alta montaña donde invernan. El añorado Lincoln Brower, biólogo del Colegio Amherst y después de la Universidad de Florida, ayudó a convencer a las autoridades mexicanas para que los protegieran, iniciando el movimiento en defensa de este lepidóptero.

A inicios de este siglo, Oberhauser y John Pleasants, ecólogo de la Universidad Estatal de Iowa, identificaron otro hábitat clave para la monarca: los campos de cultivo de Iowa y otros estados aledaños, donde el algodoncillo común (*Asclepias syriaca*) que crece entre los caballones estaba salpicado con los huevos de la mariposa. Al parecer los campos eran una vasta incubadora. Oberhauser cuenta: «Nos abrió los ojos. Reveló la gran importancia de los terrenos agrícolas, aunque los consideremos un yermo desde el punto de vista de la biodiversidad».

Visitas ulteriores de los dos investigadores revelaron que los algodoncillos de esos campos acogían hasta cuatro veces más huevos que los de los prados naturales y los campos correspondientes a zonas agrícolas protegidas. «Parecían actuar como un imán para las mariposas», afirma Pleasants.

Sin embargo, los campos del país estaban inmersos en una purga ecológica sin precedentes. La agroquímica Monsanto comercializa semillas de soja y maíz portadoras de un gen que las hace resistentes al herbicida glifosato, más conocido por su nombre comercial, Roundup. Eso significa que este puede ser aplicado en abundancia, de modo que el cultivo permanece indemne, a diferencia de casi todo lo demás que brota del suelo. Para el agricultor, la soja y el maíz resistentes al glifosato son una bendición; para las demás plantas que crecen entre los caballones, supone una sentencia de muerte. En 2007, casi toda la soja y más de la mitad del maíz que se sembraban en EE.UU. eran ya de ese tipo.

A partir de los datos recopilados en Iowa, Pleasants y Oberhauser calcularon que entre 1999 y 2010 los algodoncillos se habían reducido un 58 por ciento en todo el Medio Oeste. Brower y su equipo señalaron que en esos años las poblaciones de invernada de la mariposa se habían desplomado. Durante el invierno de 2009-2010, la extensión de bosque ocupada por ella en México se redujo a menos de la mitad respecto a la temporada anterior;





LA MONARCA necesita los algodoncillos (*Asclepias*) para procrear. Las hembras adultas ponen sus huevos en ellos (*1*). Y las orugas que nacen se alimentan en exclusiva de estas plantas (*2*).

INGO ARNDT, NATURE PICTURE LIBRARY (1); DOUG WECHSLER, NATURE PICTURE LIBRARY (2)

y por primera vez desde que se comenzaron a tomar registros, a inicios de los 90, disminuyó por debajo de las dos hectáreas. El vínculo entre las dos tendencias parecía inevitable, e impulsó a Pleasants y a Oberhauser a publicar en 2012 su histórico artículo, donde defendían que la desaparición del algodoncillo en el Medio Oeste estaba matando a la monarca. Oberhauser lo calificó como una prueba irrefutable.

Si el artículo hubiera sido sobre cualquier otro insecto, solo se habría fijado en él un puñado de especialistas. Pero la mariposa monarca ocupa un lugar especial en el corazón de los ciudadanos de los tres países norteamericanos. El llamativo color anaranjado, el gran tamaño y su grácil revoloteo pero, por encima de todo, su espectacular migración la han convertido en una celebridad muy estimada.

Y el relato contaba con un «personaje malo» al que la población ya estaba predispuesta a odiar. El fabricante de Roundup, Monsanto (ahora parte del consorcio de Bayer), encarnaba los temores de la gente ante la ingeniería genética y el control de la agricultura por parte de grandes corporaciones. Así que la idea de que el producto insignia de Monsanto estaba matando al insecto más emblemático de EE.UU. acaparó los grandes titulares. La hipótesis de Oberhauser y Pleasants tuvo una amplia cobertura por los medios de comunicación estadounidenses.

Un ejército de conservacionistas se movilizó para salvar la situación. En 2014 surgieron por todo el país más de 10.000 «estaciones de paso para la monarca», gracias a una campaña de siembra del algodoncillo impulsada por Orley «Chip» Taylor, ecoentomólogo de la Universidad de Kansas. En los años siguientes, el presidente Barack Obama y sus iguales de México y Canadá se comprometieron a proteger a la mariposa, y meses después las cámaras captaron cómo la Primera Dama acompañada de niños plantaba algodoncillo en un jardín para insectos polinizadores.

CENSOS QUE NO CUADRAN

Aunque la hipótesis del algodoncillo se ganó el apoyo del público, algunos especialistas sospechaban que su fundamento era endeble. Uno de los primeros en manifestar sus dudas fue Davis, el ecólogo de Georgia. Había estado analizando los censos de monarca cuyo desplazamiento a finales del verano en dirección a México las conduce hacia unos puntos de paso: Peninsula Point, en la orilla septentrional del lago Michigan, y el cabo May en Nueva Jersey, una pequeña lengua de tierra que separa el Atlántico de la bahía de Delaware. En ambos lugares unos voluntarios recuentan, desde hace varias décadas, los insectos y las aves que migran hacia el sur al final del verano. Como Davis destaca, las cifras no indicaron un declive sostenido, sino altibajos de año en año, algo habitual en las poblaciones de insectos.

El artículo de Davis no llamó mucho la atención cuando se publicó en 2012, y Oberhauser y Pleasants señalaron que los puntos de paso que describió estaban situados al norte y al este del cinturón del maíz, por lo que no mostrarían los efectos de las pérdidas en los campos de cultivo del Medio Oeste. «Nadie quería oír que las monarcas no se están extinguiendo, por increíble que parezca», afirma Davis.

Su artículo atrajo el interés de Anurag Agrawal, ecólogo evolutivo en la Universidad Cornell que ha estudiado el uso que la monarca hace de las sustancias que produce el algodoncillo. También él comenzó a sospechar que el argumento de Pleasants y Oberhauser, claro y convincente, era demasiado simple para explicar la dinámica demográfica de un insecto que atraviesa un paisaje tan vasto y diverso. En Nueva York, el estado donde reside Agrawal, por ejemplo, los campos agrícolas se intercalan con prados, pastos y otros entornos naturales. Le pareció que por mucho que el algodoncillo desapareciese de los caballones, habría muchos más lugares donde seguiría a disposición de la mariposa.

No todos acogieron bien ese punto de vista, asegura Agrawal. En un encuentro auspiciado por Oberhauser en la Universidad de Minnesota en 2012, preguntó a un grupo de asistentes qué opinaban del último artículo de Davis. Agrawal relata que Chip Taylor le agarró del brazo y le pidió que no sugiriera que el declive de la monarca podía ser una exageración, porque eso minaría los esfuerzos de conservación. «Para mí fue una sorpresa desagradable», explica. Taylor replica que no recuerda ese incidente y duda de que sucediese.

Otros compartían los mismos reparos que Agrawal y Davis. Una de las asistentes al encuentro, Leslie Ries, ecóloga en la Universidad de Georgetown, tomó los datos de un programa de seguimiento a cargo de la Asociación Estadounidense de Lepidopterología (NABA). Esta entidad busca voluntarios que acudan a lugares elegidos y anoten todas las mariposas que ven dentro de un círculo de 24 kilómetros de diámetro en un solo día. Ries describió en un artículo publicado en 2015 que su serie de datos, así como otra perteneciente a Illinois, no revelaban indicios de que la población septentrional de monarca hubiese descendido en 21 años.

Agrawal fue un paso más allá: recopiló varios registros prolongados de poblaciones de la mariposa en distintas fases de su ciclo biológico, que englobaban los datos de la invernada, los datos de la NABA y los censos hechos en los puntos de paso. Junto con varios colaboradores quiso ver si los cálculos demográficos correspondientes a una fase del ciclo podían predecir los de la siguiente, una cadena de eslabones crucial para el argumento de que menos plantas de algodoncillo en el Medio Oeste durante el verano significaba menos mariposas invernantes en México. En 2016, en la revista *Oikos* y, dos años más tarde, en *Science* publicaron que había un gran eslabón roto cerca del extremo de la cadena: los últimos censos de finales del verano no predecían las poblaciones invernales. Como Ries había observado, los censos estivales permanecían bastante estables aunque los invernales disminuyeran. En consonancia con Davis, Agrawal y otros concluyeron que algo parecía estar acabando con las mariposas durante su migración otoñal hacia el sur, que parecía ser más importante que los episodios ocurridos durante la época de cría estival.

Otro tipo de estudio vino a dar más argumentos a los escépticos. En 2017, Tyler Flockhart, biólogo de poblaciones entonces en la Universidad de Guelph, en Ontario, quiso averiguar no la causa de su desaparición, sino su lugar de procedencia. Con sus colaboradores analizó isótopos del hidrógeno y del carbono en más de un millar de mariposas recolectadas en México por Brower y otros a lo largo de cuatro décadas. Presentes en proporciones distintas en cada región y absorbidos por el cuerpo y las alas del insecto, esos isótopos dejan una especie de rastro que indica dónde se ha estado alimentando la mariposa invernante. Flockhart llegó a la conclusión de que el Medio Oeste parecía ser el punto de partida de solo el 38 por ciento de las monarcas que se dirigían a México. Un gran número de ellas provenían del nordeste y del sur de EE.UU., así como del centro y del este de Canadá, donde los maizales y los campos de soja ocupan, en porcentaje, menos extensión.

Los altibajos de la monarca

Cada año, millones de mariposas monarca viajan desde su refugio invernal en las montañas de México hasta los campos de cría estivales en el este de EE.UU. y Canadá. La población invernal ha menguado a un ritmo alarmante. Primero se achacó al efecto de los herbicidas sobre los algodoncillos, donde las mariposas ponen huevos en el Medio Oeste de EE.UU. Pero datos recientes muestran que sus poblaciones sufren altibajos, lo que ha impulsado a algunos ecólogos a plantear que no es esta la verdadera amenaza. Pero otros siguen convencidos de que el problema reside en la desaparición de los algodoncillos.

CANADÁ

EE.UU.

Monarcas orientales

Monarcas occidentales

Generaciones del Medio Oeste

Generaciones nororientales

GOLFO DE MÉXICO

MÉXICO

Otro grupo permanece al oeste de las Montañas Rocosas, donde pasa el invierno en la costa californiana. Los efectivos de esta población han pasado de millones a escasas 30.000 en fechas recientes. Como su hábitat es distinto del de la monarca oriental, se cree que las causas del desplome no son las mismas.

Reserva de invernada (bosque de pinos y encinas en Michoacán, México)

Migración y reproducción primaverales y estivales
1.ª generación
2.ª generación
3.ª generación
? 4.ª generación (en ocasiones)

Migración otoñal
Supergeneración de invernada

Enero
Febrero
Marzo
Abril
Mayo
Junio
Julio
Agosto
Septiembre
Octubre
Noviembre
Diciembre

INVERNADA

MIGRACIÓN PRIMAVERAL Y CRÍA

MIGRACIÓN ESTIVAL Y CRÍA

MIGRACIÓN OTOÑAL

Ciclo de migración anual: de cuatro a cinco generaciones

Huevo 3-5 días

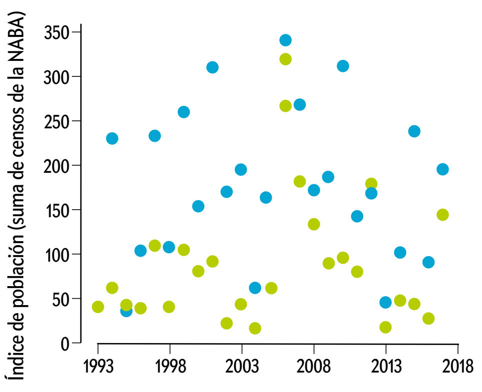
Larva/oruga 9-14 días

Crisálida 8-13 días

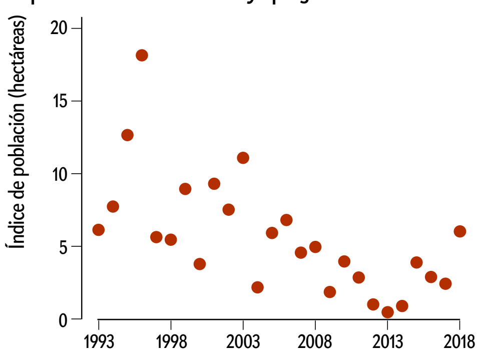
Tiempo en que el adulto pone huevos: 5 días

Cada generación vive alrededor de un mes, salvo la supergeneración de la invernada, que llega a vivir ocho.

Las poblaciones del Medio Oeste y del Nordeste fluctúan



La población invernal disminuye progresivamente

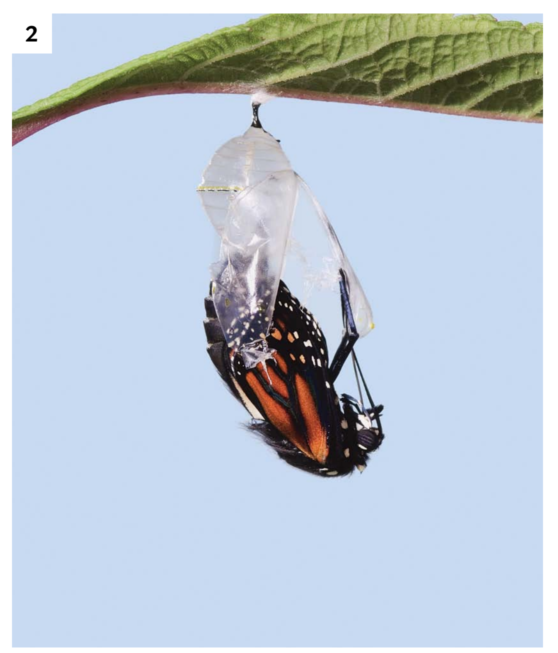


Tendencias divergentes y estaciones dispares

Desde 1993, los censos estivales de monarcas en el Medio Oeste y el Nordeste de EE.UU., calculados por el ecólogo de la Universidad Cornell Anurag Agrawal y sus colaboradores, muestran altos y bajos reiterados. Los ciclos inducen a los especialistas a creer que la desaparición del algodoncillo no supone una amenaza para las mariposas estivales. Pero los censos de la monarca en su pequeño refugio invernal de México muestran una tendencia a la baja. (Este grupo se ha recuperado un poco en los últimos tres años, pero sin recobrar la abundancia de antaño.) Esto señala a un problema persistente cerca del extremo sur de la migración, quizá la pérdida de bosques o de plantas nectaríferas.

FUENTES: «MECHANISMS BEHIND THE MONARCH'S DECLINE» POR ANURAG A. AGRAWAL Y HIDETOSHI INAMINE EN *SCIENCE*, VOL. 360, JUNIO DE 2018; FONDO MUNDIAL PARA LA NATURALEZA, MÉXICO (*datos de la población invernal de 2018*); PROYECTO DE CIENCIA CIUDADANA JOURNEY NORTH, JARDÍN BOTÁNICO DE LA UNIVERSIDAD DE WISCONSIN EN MADISON (*ciclo anual*); NIGEL HAWTIN (*gráfico*)







DIEZ DÍAS DESPUÉS de formarse la crisálida, emerge de ella la mariposa adulta. Esta se retuerce para desprenderse del capullo (*1*) y se abre paso al exterior (*2*). Por último, el nuevo adulto despliega las alas (*3*, *4*). Cada año se suceden cuatro o cinco generaciones de mariposas.

OTROS SOSPECHOSOS

Para Agrawal y Davis, Flockhart había aportado pruebas más abrumadoras que rebatían la hipótesis del algodoncillo como factor limitante. Si menos de dos quintas partes de las mariposas tenían como punto de partida el cinturón del maíz, se preguntaron: ¿cómo podía la desaparición del algodoncillo explicar la drástica reducción en México?

El propio Flockhart es más prudente. Si bien a lo largo de Norteamérica tal vez sobrevivan los algodoncillos suficientes para sostener a una población sana de la monarca, sospecha que la aplicación del Roundup podría haber alterado la distribución de estas plantas, con consecuencias dañinas. Si el efecto de esta sustancia ha sido concentrar las especies de algodoncillo en zonas más pequeñas fuera de los campos agrícolas, quizá las hembras estén ahora obligadas a poner todos sus huevos más próximos entre sí; y ello tal vez obligue a las orugas a competir más por el alimento y someta a estrés a la población, sugiere.

La conjetura de Flockhart pone de relieve un dilema que encaran los contrarios a la hipótesis del algodoncillo, como Agrawal y Davis. Simplemente no bastaba con abrir brechas en ella. Necesitaban a otro culpable para convencer a sus iguales de que alguna otra cosa estaba sucediendo, pero no tenían a ninguno.

Entonces, en primavera de 2019, otros investigadores hallaron dos sospechosos prometedores: los daños sufridos por las plantas nectaríferas que crecen a lo largo de la ruta migratoria y los cambios en la densidad de los bosques de México. En un artículo publicado en *Proceedings of the National Academy of Sciences* USA, un equipo encabezado por Elise Zipkin, ecóloga cuantitativa de la Universidad Estatal de Michigan, examinó las correlaciones estadísticas entre el tamaño de las poblaciones de la monarca en distintas épocas del año y un vasto conjunto de datos ambientales. Fue la primera investigación que dividió las mariposas invernantes en sus 19 colonias, en lugar de agrupar todas las zonas boscosas. Resultó que las colonias que gozaban de una cobertura forestal más densa albergaban más lepidópteros. «Me sorprende que nadie prestara atención a este aspecto antes», confiesa Zipkin.

El equipo también recurrió a imágenes captadas por satélite para cuantificar la masa vegetal en un entorno dado. Cuando el sur de EE.UU. era más verde en otoño, llegaban a México más monarcas; cuando estaba más parduzco, como sucede durante las épocas de sequía, su número disminuía. Zipkin y los otros autores del artículo sospechan que dicha pauta surgió porque las plantas sanas y verdes producen más néctar capaz de sostener a las monarcas en migración. Y, además, una intensa sequía azotó el sur de EE.UU. entre 2010 y 2013, el mismo momento en que la población mexicana de Monarca alcanzaba sus mínimos.

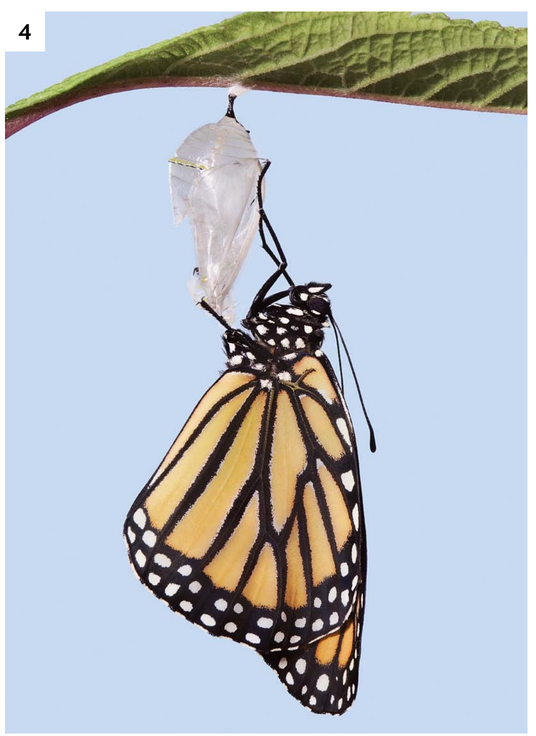
Para Agrawal y Davis, el estudio señalaba a causas reales, no relacionadas con el algodoncillo, como responsables de los problemas demográficos en las últimas etapas de la migración. «Es el artículo que lo aborda con un enfoque más cuantitativo», opina el primero. Hay otros sospechosos más vagos. Davis cree que un protozoo parásito que las infecta podría estar en auge. Según una investigación de su colega de la Universidad de Georgia y a la sazón esposa, la ecóloga Sonia Altizer, la abundancia de *Ophryocystis elektroscirrha*, que puede debilitar o matar a la mariposa, podría estar aumentando en los ejemplares del sur de EE.UU. Asimismo, Davis y otros investigadores han planteado que la alteración del hábitat ha aumentado el estrés fisiológico que sufre la mariposa en migración, minando su resistencia durante el largo trayecto otoñal.

UN CASO NUEVO

Las últimas pruebas apuntarían a varios culpables del declive de la monarca, no a uno solo. Ese punto de vista ha llegado a convencer —en parte— a Oberhauser, que fue la primera en proponer la hipótesis del algodoncillo. «Seguramente he sido demasiado vehemente en mi argumento de que no sucedía nada a lo largo de su migración», comenta la ahora directora del Jardín Botánico de la Universidad de Wisconsin en Madison. Otros describen su grave situación como una muerte lenta por multitud de causas.

Pero aún así cree que la desaparición del algodoncillo es la más importante. «Conozco muy bien a Andy y a Anurag. Los aprecio mucho», declara Oberhauser. «Pero estoy cansada de ese





argumento» de que la principal responsable de la mortandad invernal es otra que la desaparición de los algodoncillos. ¿Cómo puede pasar inadvertido algo que acaba con tantas mariposas en su camino hacia México?, se pregunta. Solo la escasez de algodoncillos y las inclemencias meteorológicas afectan seriamente a los efectivos de monarcas, según un modelo computacional que ella y sus colaboradores usaron en un estudio de 2017.

Oberhauser y Pleasants también sostienen que los censos estivales que no muestran ningún descenso —cifras que dan por buenas Agrawal, Ries y Davis— adolecen de problemas: fueron hechos por voluntarios que raramente se aventuran en los campos sembrados, por lo que no detectaron los acusados descensos de la población en esos lugares. Insiste que, lógicamente, tiene que haber bajas estivales. Si las poblaciones invernales de la monarca disminuyen cada año que pasa, ¿cómo puede la descendencia de ese grupo en recesión repuntar tanto en verano durante tantos años? «Desde el punto de vista de la biología, no tiene ningún sentido», asegura.

Zipkin también cree que la hipótesis del algodoncillo sigue sobre la mesa. Junto con Oberhauser, ha hallado indicios en datos de Illinois de que el glifosato, sumado a otros cambios en el clima primaveral, afectan a la abundancia local de la mariposa en verano. «Me cuesta creer que la escasez de algodoncillo en el campo no repercuta en ella. Mi pregunta es: ¿en qué grado la afecta?», comenta Zipkin.

Esa es la misma pregunta que se hace todo el mundo. Para obtener una respuesta se ha emprendido una campaña de recogida de datos, el Programa Integral de Seguimiento de la Monarca, que pretende obtener censos fiables de la especie correlacionados con las variables del hábitat en cientos de localidades de EE.UU. Los coordinadores del programa han seleccionado al azar los lugares y han invitado a científicos profesionales y aficionados a que envíen datos recopilados en ellos con unos criterios unificados para buscar tendencias. Los voluntarios llevan recabando datos desde 2017; ahora hay 120 personas que se apostan en 235 localidades. «Comenzamos a disponer de un volumen notable que sigue aumentando», explica Oberhauser.

Todas las partes coinciden en que la monarca no puede esperar a que los expertos se pongan de acuerdo. La extensión de su refugio forestal en México se contrajo drásticamente en 2013 a una superficie apenas más grande que la de un campo de fútbol, un triste récord. Y aunque la población migrante se ha recuperado algo desde entonces, la mayoría califica de precaria su situación. El Servicio de Fauna y Pesca de EE.UU. afirma que al final de este año tomará una decisión sobre la solicitud de calificar la especie como amenazada.

Para mejorar las regiones que en general acogen a la mariposa, a Oberhauser le gustaría ver que el Ministerio de Agricultura de EE.UU. amplía las hectáreas del Programa de Reservas de Conservación (el principal del país que sustenta las zonas protegidas en tierras agrícolas), pues han descendido por debajo de los 9,3 millones desde el máximo alcanzado en 2007, de casi 15 millones.

Reforzar las medidas de conservación también es necesario en los bosques de México, afirman los investigadores. Aunque el corazón del bosque goza de protección —es Reserva de la Biosfera de la UNESCO—, la tala prosigue en la periferia, donde las mariposas también pasan tiempo y las plantaciones ilegales de aguacate comienzan a hacer incursiones. El calentamiento del clima podría hacer que la reserva dejara de ser habitable para los abetos, sustento de la mariposa, pues precisan temperaturas bajas. Ya hay en marcha una iniciativa para plantarlos ladera arriba, en zonas más frías.

La mariposa monarca representa muchas cosas para mucha gente: una obsesión para los jardineros y los naturalistas, un referente para los conservacionistas, un embajador de buena voluntad internacional para los políticos y, para gran parte del público, un recipiente para las inquietudes sobre el creciente impacto que la humanidad tiene en el planeta. Su migración comenzó siendo un misterio en el siglo XIX, cuya resolución un siglo después la convirtió en un prodigio de la naturaleza. Ahora se halla en el centro de otra incógnita y esta vez su destino podría depender de la respuesta. IyC

PARA SABER MÁS

Milkweed loss in agricultural fields because of herbicide use: Effect on the monarch butterfly population. John M. Pleasants y Karen S. Oberhauser en *Insect Conservation and Diversity*, vol. 6, n.º 2, págs. 135-144, marzo de 2013 (publicación avanzada en marzo de 2012).

Monarch butterfly population decline in North America: Identifying the threatening processes. Wayne E. Thogmartin et al. en *Royal Society Open Science*, vol. 4, n.º 9, artículo n.º 170760, septiembre de 2017.

Mechanisms behind the monarch's decline. Anurag A. Agrawal y Hidetoshi Inamine en *Science*, vol. 360, págs. 1294-1296, 22 de junio de 2018.

Plan de acción para la conservación de la mariposa monarca en México 2018-2024: **https://www.conanp.gob.mx/documentos/PlandeAccionMonarca2018-2024.pdf**

Multiscale seasonal factors drive the size of winter monarch colonies. Sarah P. Saunders et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, vol. 116, n.º 17, págs. 8609-8614, 23 de abril de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Las asclepias y sus visitantes. Douglass H. Morse en *IyC*, septiembre de 1985.

Los secretos de la mariposa monarca, revelados. Shawn Carlson en *IyC*, noviembre de 1997.

Mariposas migratorias. Sandra M. Perez, Orley R. Taylor y Rudolf Jander en *IyC*, noviembre de 1998.

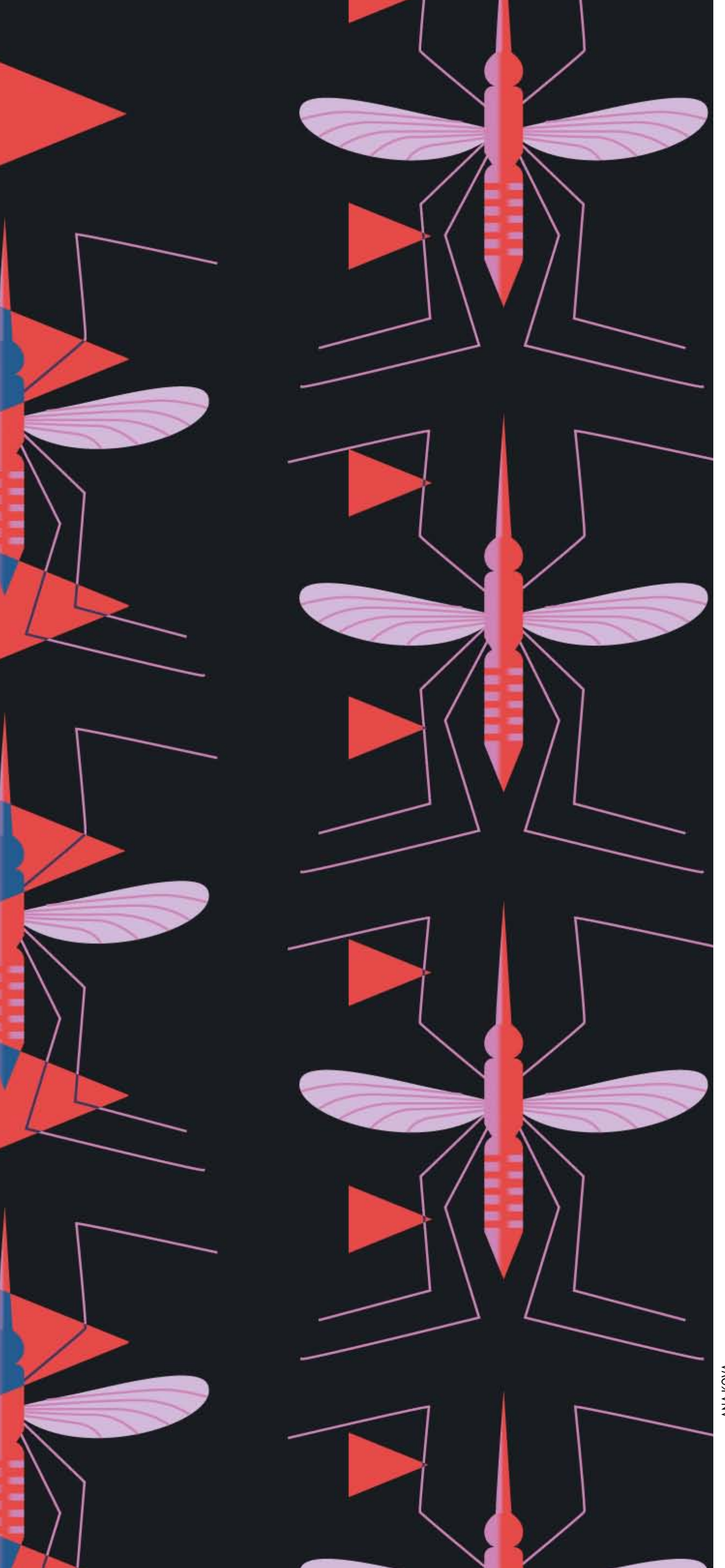
INGENIERÍA GENÉTICA

PROMESAS Y RIESGOS DEL IMPULSO GÉNICO



Cinco cuestiones clave que los investigadores deberían responder antes de desplegar esta técnica en la naturaleza

Megan Scudellari



ANA KOVA

OCHO LARGOS AÑOS LLEVABAN intentando piratear el genoma de un mosquito dos genéticos del Colegio Imperial de Londres. Con esta burla a la selección natural pretendían insertar un gen que corriese como la pólvora en la población del insecto, de tal modo que la mutación se transmitiese con más rapidez que la propia de la herencia. La idea que desde el principio rondaba por la cabeza de Austin Burt y Andrea Crisanti era hallar una protección contra el paludismo basada en la diseminación de un gen que acabase con el vector de la enfermedad, que no es otro que el mosquito.

Crisanti recuerda cómo, tras una serie de fracasos, al fin consiguieron en 2011 un ADN que daba los resultados ansiados: el gen inserto en el genoma del mosquito se había extendido por la población y aparecía en más del 85 por ciento de la descendencia.

Se trataba del primer éxito de la técnica denominada «impulso génico» (*gene drive*): la modificación de un gen para que este se propague por una población a más velocidad de la que es capaz la herencia normal. El impulso génico no ha tardado en ser algo habitual en algunos laboratorios, donde en pocos meses es posible ultimar un genoimpulsor, el artefacto necesario para hacer de ella una realidad. La técnica altera o silencia un gen concreto, o inserta otro nuevo, sirviéndose de la herramienta de edición génica CRISPR y de un trozo de ARN. En la siguiente generación, el genoimpulsor se autocopia entero en el cromosoma homólogo, de tal forma que el genoma deja de contener la versión natural del gen elegido, que es sustituida por dos copias del genoimpulsor. Así el cambio se transmite casi al cien por cien de la descendencia, en vez de solo a la mitad.

Desde 2014 se han estado construyendo sistemas de impulso génico basados en CRISPR destinados a los mosquitos, las moscas de la fruta y los hongos, y ya se están desarrollando para los ratones. No es más que el principio. Nuevas incógnitas han reemplazado a los interrogantes sobre el montaje de los genoimpulsores: ¿funcionarán?, ¿cómo podemos analizarlos? y ¿quién debería regular su empleo? Múltiples son las aplicaciones que se barajan, como la reducción o la erradicación de las enfermedades transmitidas por los insectos, el control de las especies invasoras o incluso la reversión de la resistencia a los insecticidas de las plagas. Todavía no se ha liberado en la naturaleza ningún genoimpulsor artificial, pero Crisanti calcula que en principio todo podría estar listo en un par de años. Colabora con Target Malaria, un consorcio internacional de investigación sin ánimo de lucro que pretende liberar los mosquitos genodirigidos como medio de control del paludismo en África. El 1 de julio del año pasado, el grupo soltó en un pueblo de Burkina Faso un lote de mosquitos de prueba manipulados genéticamente, pero desprovistos del genoimpulsor.

Según Fredos Okumu, director científico en el Instituto de Salud Ifakara en Dar es Salaam, Tanzania, «el impulso génico es diferente a cualquier otro remedio ecológico investigado hasta ahora, porque los genoimpulsores se propagan por sí solos. Tenemos que preparar a la gente y compartir abiertamente la información con todos los países implicados».

Los retos técnicos no son tan desalentadores como los sociales y los diplomáticos, nos explica el bioingeniero Kevin Esvelt, del Media Lab del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), uno de los pioneros en la construcción de genoimpulsores basados en CRISPR: «Este tipo de técnicas tienen consecuencias tangibles para la vida de la gente, a veces con efectos casi inmediatos».

Ante los problemas que pudiera entrañar el impulso génico, planteamos cinco preguntas clave sobre esta técnica.

¿FUNCIONARÁ ALGUNA VEZ?

Construir un genoimpulsor para manipular o erradicar una población es como buscar pelea con la selección natural; una lucha desigual.

En cuanto los genoimpulsores se comenzaron a fabricar con regularidad en el laboratorio, los animales se hicieron resistentes a estos por la acumulación de mutaciones que impedían su propagación. Por ejemplo, en las pruebas con dos de esos elementos en la mosca de la fruta surgieron con frecuencia variantes genéticas que conferían resistencia. Lo más habitual era que alterasen la secuencia que CRISPR debía reconocer, con lo que la edición del gen se desbarataba. En los experimentos con mosquitos en jaulas, Cristanti y Tony Nolan, otro colega de Target Malaria, observaron una disminución gradual de la frecuencia de un genoimpulsor al cabo de numerosas generaciones a causa de las mutaciones de resistencia en el gen diana. Los resultados no llamaban al optimismo: ¿convertirían las resistencias en fútil el impulso génico?

No necesariamente, siempre que uno sepa elegir bien la diana. Ciertos genes están muy conservados, por lo que es probable que cualquier cambio en ellos acabe matando a su portador. Si tales genes se escogen como diana del genoimpulsor, es probable que surjan menos mutaciones y menos resistencia. En septiembre de 2018, Crisanti y su equipo acabaron con todos los individuos de una población enjaulada de mosquitos *Anopheles gambiae* gracias a un genoimpulsor que anulaba un gen ligado a la fecundidad llamado *doublesex*. Con el genoimpulsor en su sitio, las hembras ni picaban ni ponían huevos; al cabo de 8 a 12 generaciones, la población de las jaulas no engendraba huevo alguno. Como esto es primordial para la reproducción, *doublesex* es resistente a las mutaciones, incluso las que confieren resistencia a una construcción de impulso génico.

Crisanti asegura que su equipo ha llevado a cabo nueve experimentos en jaulas con más de un millón de inserciones de genoimpulsores que actúan selectivamente sobre *doublesex* y nunca ha observado ninguna resistencia. Ahora están adaptando el genoimpulsor para cortar no uno, sino dos locus del gen *doublesex*, por analogía con el tratamiento politerápico de una enfermedad. En sus propias palabras: «Quiero estar seguro de que la probabilidad de que surja resistencia es muy remota antes de afirmar que todo está listo para la aplicación en el campo».

En los mamíferos es preciso lidiar con muchos otros problemas básicos, además de la resistencia. En 2018, Kim Cooper y sus colaboradores de la Universidad de California en San Diego (UCSD) comenzaron la construcción de un genoimpulsor que interrumpe el gen *Tyr* murino y emblanquece el pelaje del ratón. Según ella, solo tenía una eficacia de autocopia en el genoma del 72 por ciento y no funcionaba bien en las células reproductoras masculinas. Sospecha que la razón reside en que la división celular que tiene lugar durante la formación del ovocito y del espermatozoide se da en momentos distintos, lo cual parece afectar a la capacidad del genoimpulsor para copiarse con éxito de un cromosoma a otro.

En dicho experimento, la autopropagación no se consumó y no se le siguió el rastro durante varias generaciones, por eso Cooper insiste en que, técnicamente, no se puede considerar impulso génico. A esto añadió que «aún queda mucho para demostrar que algo así sea factible».

¿QUÉ OTROS USOS PUEDE TENER?

Aunque el campo del impulso génico aparece dominado por las aplicaciones contra los mosquitos, otras opciones que se contemplan son la conservación de los ecosistemas vulnerables y la aceleración del trabajo de laboratorio.

El genoma de algunos organismos resulta difícil de modificar, por lo que lograr ese objetivo facilitaría su estudio. Tomemos *Candida albicans*, un hongo patógeno que a menudo es resistente a los fármacos. Cuando era investigadora postdoctoral en el Instituto Broad y en el MIT, Rebecca Shapiro ideó un sistema para la inserción dirigida de mutaciones en él cuya eficacia rondaba el cien por cien. Hoy consigue silenciar, en cultivo, dos genes distintos y que dichas mutaciones se leguen a la descendencia. «Es increíble lo bien que funciona», afirma Shapiro, ahora en la Universidad de Guelph, Canadá. En la USCD, Cooper está recurriendo al impulso génico con un propósito parecido: el de crear y estudiar los rasgos complejos en los ratones.

El programa de Biocontrol Genético de Roedores Invasores (GBIRd, por sus siglas en inglés) quiere que los ratones genodirigidos sirvan para algo más que meros estudios de laboratorio. El GBIRd es una sociedad civil de universidades, gobiernos y organizaciones no gubernamentales gestionada por Island Conservation, una entidad sin ánimo de lucro que pretende usarla para exterminar los roedores que invaden las islas, donde causan estragos en la fauna y la flora autóctonas. Por ahora se les controla con plaguicidas, pero son productos caros y difíciles de



Megan Scudellari es periodista científica especializada en ciencias biológicas y biotecnología radicada en Boston.

EN SÍNTESIS

El impulso génico abre posibilidades inéditas en el control de los patógenos, los vectores de enfermedades infecciosas y otras plagas.

Sin embargo, los cambios en el genoma de las especies y sus consecuencias a largo plazo generan desconfianza.

En medio del debate ético y ecológico, ya se han iniciado los ensayos preliminares en el campo.

aplicar en las islas más extensas con población humana. Y solo resultan viables en un 15 por ciento de ellas, nos comenta Royden Saah, el director del programa de GBIRd. «Andamos buscando alternativas que puedan encargarse del 85 por ciento restante.»

Los miembros del GBIRd David Threadgill, de la Universidad A&M de Texas en College Station, y Paul Thomas, de la australiana Universidad de Adelaida, están desarrollando técnicas de impulso génico en los ratones, aunque Saah opina que pasarán varios años antes de que funcionen.

Entretanto, algunos expertos dedicados a los mosquitos esperan prevenir las enfermedades que estos transmiten con ensayos más sutiles que la aniquilación de las poblaciones. En mayo de 2019, Omar Akbari y sus colaboradores de la UCSD describieron la manipulación de *Aedes aegypti* para que expresase un anticuerpo que lo protegiese contra las cuatro cepas principales del dengue. Ahora están ligando ese anticuerpo a un genoimpulsor para comprobar si se propaga. También diseñan un genoimpulsor polivalente que active una toxina cuando cualquier virus, no solo el del dengue, infecte un *A. aegypti*. Según Akbari, «queremos construir un caballo de Troya en el mosquito para que cuando sea infectado por un virus (dengue, zika, chicungunya, fiebre amarilla, etc.), nuestro sistema se active y mate al insecto».

¿ES CONTROLABLE?

Antes de que Kevin Esvelt construyese el primer genoimpulsor basado en CRISPR, se despertaba con sudores fríos pensando en las consecuencias. «Desde luego que era consciente de que la cosa no se limitaría al paludismo, sino que cualquiera capaz de crear una mosca de la fruta transgénica podría editar a partir de ahora todas las moscas de esa especie.»

No sorprende pues, que en 2014, cuando Esvelt y el genético George Church idearon su primer genoimpulsor en la Facultad de Medicina de Harvard, construyeran a la vez un genoimpulsor inverso capaz de neutralizarlo cuando se creyera necesario.

Los demás investigadores del campo han incorporado controladores, inactivadores externos o ambos a sus genoimpulsores. El grueso de la financiación para esos estudios viene de la Agencia Estadounidense de Proyectos de Investigación Avanzada de Defensa (DARPA, por sus siglas en inglés), brazo científico del Ministerio de Defensa. En 2017, el programa Genes Seguros de la agencia anunció que se habían invertido 65 millones de dólares en el estudio del control, la neutralización y la reversión de los genoimpulsores, a cargo de siete equipos de investigación del país. «Nuestro objetivo es mitigar el uso indebido, tanto si es accidental como deliberado con fines perversos», nos informa Renee Wegrzyn, la directora del programa.

Financiado en la fase inicial del programa, Esvelt concibió un genoimpulsor de vida limitada llamado margarita, por haber sido diseñado para perder los enlaces de uno en uno, como cuando se deshojan los pétalos, hasta que al cabo de varias generaciones no quede ninguno.

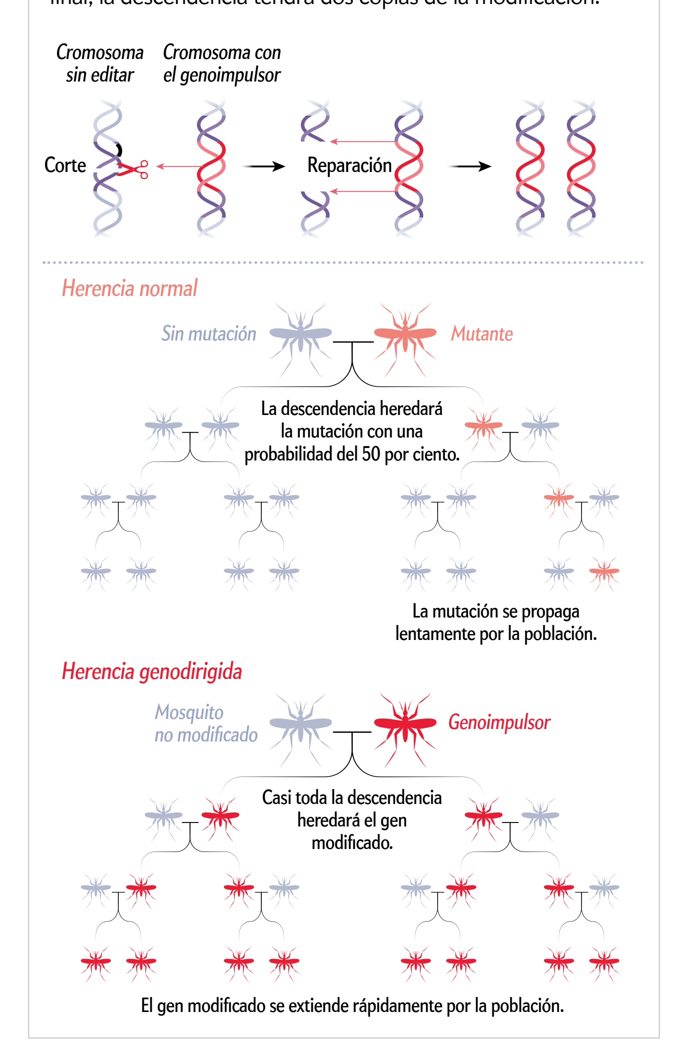
El equipo de Akbari en la UCSD está diseñando con financiación de la DARPA genoimpulsores incapaces de propagarse fuera de la población deseada de moscas o mosquitos. Estos deben ser liberados de manera continuada durante muchas generaciones, pero cuando cesara empezarían a diluirse con las versiones naturales del gen y desaparecerían en menos de cuatro años. Ese plazo bastaría en principio para acabar con virus como el del Zika o el del dengue de una población de mosquitos, indica Akbari. «A mi juicio, es un poco más seguro y sigue siendo bastante eficaz.» El equipo ya ha creado versiones para *A. aegypti*, el principal vector del virus del dengue.

CÓMO FUNCIONA

El genoimpulsor en acción

El impulso génico emplea CRISPR para insertar y propagar una modificación génica por una población a mayor velocidad que la propia de la herencia en circunstancias normales. Se planea el uso de los genoimpulsores como medio para erradicar los mosquitos transmisores del paludismo y de otras plagas.

Una vez que se introduce un genoimpulsor artificial en el genoma de un animal, su descendencia lo heredará en un cromosoma, junto con el gen normal aportado por su otro progenitor. Al comienzo del desarrollo, la porción CRISPR del genoimpulsor cortará la otra copia, corte que se reparará a continuación con la plantilla que aporta el genoimpulsor. Al final, la descendencia tendrá dos copias de la modificación.



El equipo de Target Malaria está desarrollando otra contramedida, financiada por la DARPA, destinada a detener la propagación del genoimpulsor inserto en *doublesex* en una población.

¿CÓMO SE PONE A PRUEBA UN GENOIMPULSOR?

En vez de un ensayo de campo —que el contrato de Genes Seguros de la DARPA prohíbe expresamente y para el que todos coinciden que no ha llegado el momento—, los equipos están aumentando la escala de los experimentos en jaulas y constru-

yendo modelos ecológicos para explorar los riesgos y los beneficios de la liberación segura en la naturaleza.

En la ciudad de Terni, en el centro de Italia, Crisanti y Nolan han sometido las jaulas de mosquitos a condiciones medioambientales cambiantes. «Queremos ampliar la escala para someterlo a prueba en diferentes acervos genéticos, en situaciones más reales», cuenta Nolan, que ahora dirige un laboratorio de la Facultad de Medicina Tropical en Liverpool. Ambos querían replicar el comportamiento de cortejo natural, como la enjambrazón de machos que atrae a las hembras, para observar si en esas condiciones varía la propagación del genoimpulsor.

La dinámica de la propagación facilitada por el impulso génico en las jaulas es por ahora «prometedora», nos revela Crisanti, pues el genoimpulsor se transmite bien sin signos de resistencia. Si no surgen problemas en los experimentos a gran escala en las jaulas, el equipo cederá la técnica a otros grupos independientes, con vistas a conseguir la autorización reglamentaria en unos tres años.

El equipo de Target Malaria también está construyendo modelos ecológicos de enclaves para una liberación prospectiva con los que calcular la dinámica sobre el terreno. El estudio más reciente modela las poblaciones de mosquitos en más de 40.000 asentamientos en Burkina Faso y los países circundantes. Tiene en cuenta ríos, lagos y cascadas, así como los datos de campo sobre el movimiento de estos insectos. Los resultados demuestran que no bastará con introducir una vez los mosquitos modificados para reducir su abundancia, habrá que hacerlo repetidamente a lo largo de varios años.

Según el biólogo de poblaciones Charles Godfray en la Universidad de Oxford, colaborador de Target Malaria y del investigador principal del estudio: «La teoría afirma que, en principio, con una sola suelta se extendería por todo el continente. La realidad es que eso ocurriría con suma lentitud».

Otro problema radica en la capacidad que los genoimpulsores tienen de alterar las poblaciones enteras y, por ende, todo el ecosistema. Al menos sobre el papel podrían perjudicar a la salud humana, pues quizá harían que el parásito del paludismo adquiriese más virulencia o que se mudase a otro hospedador, comenta la bióloga molecular y bioética Natalie Kofler. Esta directora y fundadora del grupo Editing Nature en la Universidad Yale, persigue el abordaje de las técnicas genéticas ambientales en todo el mundo. Para ella, «tiene posibilidades de convertirse en un artefacto inmensamente poderoso y de cambiar el curso de los acontecimientos, tal vez de modo impredecible».

¿QUIÉN DECIDE CUÁNDO USARLA?

En los ensayos con fármacos, los preparativos para la puesta en marcha se inician con un año o dos de antelación. Los genoimpulsores exigirán más tiempo, según Okumu, quien en 2018 formó parte de un grupo de trabajo de 15 científicos, organizado por la Fundación de los Institutos Nacionales de la Salud estadounidenses (NIH) y encargado de redactar una serie de recomendaciones para el uso de los mosquitos genodirigidos en el África subsahariana.

El informe destaca que los Gobiernos, las comunidades y los científicos locales necesitarán tiempo para asimilar los conocimientos y participar en la regulación de la técnica. Okumu afirma estar «convencido de que, al final, las personas idóneas para tomar esas decisiones serán las de los propios países».

En 2017, Kofler convocó a científicos y expertos en ética para deliberar sobre las cuestiones sociales que rodean el impulso génico. Según ella, «las principales incógnitas se centran en la justicia». En los debates sobre la liberación de organismos genomodificados en un entorno africano, los grupos que llevan toda la vida marginados deben participar en la toma de decisiones.

Okumu quiere que los científicos africanos desarrollen y analicen el impulso génico, pero para eso habrán de contar con la voluntad de quienes financiarán esos experimentos, los patrocinadores. Opina que «la gente teme a lo desconocido y ahora mismo lo desconocido se está presentado a través del prisma occidental. Pienso que llegará el día en que esos artefactos se harán en nuestros propios laboratorios y de ese modo crearemos un consorcio local».

En agosto de 2018, la Agencia Nacional de Bioseguridad de Burkina Faso autorizó que Target Malaria liberase en el continente africano una cepa estéril de mosquitos machos genomodificados, la primera de su clase. En el verano de 2019, el equipo ya liberó unos 6400, aunque desprovistos de genoimpulsores. Esperan que las sueltas mejoren la percepción de la investigación y aporten datos para operaciones similares en el futuro.

Si bien los ratones genodirigidos distan de estar listos para la liberación, el GBIRd ya está trabajando con asesores de riesgo, expertos en ética y ecólogos en la elección de una isla apta para el primer estudio de campo. Según Saah, «queremos estar seguros de que las cosas se hacen bien. Con independencia de lo rápido que progresen las técnicas, debemos avanzar en los aspectos sociales y éticos». IyC

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 571, págs. 160-162, 2019.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2019

Con la colaboración de nature

SI TE INTERESA ESTE TEMA...

Descubre *Edición genética: CRISPR*, nuestro monográfico digital (en PDF) que recoge los artículos sobre el origen de esta técnica revolucionaria, sus múltiples aplicaciones y el debate ético que genera su uso.



www.investigacionyciencia.es/revistas/especial

PARA SABER MÁS

A synthetic homing endonuclease-based gene drive system in the human malaria mosquito. Nikolai Windbichler, Miriam Menichelli, Philippos Aris Papathanos et al. en *Nature*, vol. 473, págs. 212-215, abril de 2011.
A CRISPR–Cas9 gene drive targeting *doublesex* causes complete population suppression in caged *Anopheles gambiae* mosquitoes. Kyros Kirou et al. en *Nature Biotechnology*, vol. 36, págs. 1062-1066, septiembre de 2018.
Modelling the potential of genetic control of malaria mosquitoes at national scale. Ace R. North, Austin Burt y H. Charles J. Godfray en *BMC Biology*, vol. 17, artículo n.º 26, marzo de 2019.
Editing nature: Local roots of global governance. N. Kofler, J. P. Collins, J. Kuzma et al. en *Science*, vol. 362, págs. 527-529, noviembre de 2018.

EN NUESTRO ARCHIVO

Riesgos de la edición genética. Jeantine Lunshof en *IyC*, agosto de 2015.
¿Salvará la ingeniería genética a las Galápagos? Stephen S. Hall en *IyC*, febrero de 2018.
La lucha contra los mosquitos. Dan Strickman en *IyC*, diciembre de 2018.

MEDICINA

EL MÉTODO GENÉTICO QUE ESTÁ REVOLUCIONANDO LA EPIDEMIOLOGÍA

La aleatorización mendeliana ofrece una forma sencilla de distinguir la causalidad de la correlación. Pero ¿se está empleando en exceso?

David Adam

En 1812, el oftalmólogo británico James Ware comunicó a los miembros de la Real Sociedad de Londres un extraño descubrimiento. De los miles de jóvenes reclutados en los regimientos del Ejército británico, tan solo seis habían sido rechazados por visión deficiente en 20 años, mientras que un cuarto de los estudiantes de la misma edad que asistían a la Universidad de Oxford precisaban una lupa o gafas.

Ware no sacó conclusiones sobre causa y efecto: que la intensa lectura de libros podría ser responsable de la mala vista, por ejemplo, o que los que llevan gafas sienten una atracción natural por las actividades universitarias. Y menos mal. Los epidemiólogos se sienten frustrados desde hace mucho por las observaciones que vinculan exposiciones ambientales con la salud. La miopía es un ejemplo clásico. Décadas de estudios demuestran que los niños que pasan más tiempo en el colegio tienen peor vista. Pero los datos no indican si la escuela causa miopía a los niños o si los que son miopes pasan allí más tiempo. O si otro factor, como la situación socioeconómica, fomenta ambas cosas.

Hartos de este callejón sin salida, a principios de este siglo ciertos epidemiólogos empezaron a insinuar que su especialidad tenía los días contados y que los avances en genética conseguirían mejores resultados.

Tenían razón a medias. Dos décadas después, la genética ha transformado el modo de distinguir la correlación de la causalidad, encumbrando la epidemiología, en lugar de enterrarla. Resulta que las diferencias genéticas, empleadas como sustitutos de la exposición ambiental, ayudan a eliminar variables de confusión de los análisis. Esta es la base de la técnica denominada aleatorización mendeliana.

Se ha utilizado para reevaluar datos observacionales y extraer nuevas conclusiones, más sólidas, acerca de interrogantes habituales sobre causa y efecto. Los análisis han ratificado, por ejemplo, que los niveles bajos de colesterol no provocan cáncer,

ACAPULCO STUDIO



que beber pequeñas cantidades de alcohol no protege el corazón y que, en efecto, la escuela produce miopía a los niños.

«En principio, la aleatorización mendeliana es una idea estupenda. Pretende resolver uno de los problemas epidemiológicos más desalentadores», refiere Philipp Koellinger, experto en genética social de la Universidad Libre de Ámsterdam.

David Adam es periodista científico especializado en medioambiente, tecnología y medicina. Colabora con *Nature* y *The Guardian*.



UN MÉTODO EN AUGE

Uno de los pioneros de esta técnica, George Davey Smith, epidemiólogo clínico de la Universidad de Bristol, explica: «Se abrió camino porque buscábamos desesperadamente formas de obtener mejor inferencia causal en epidemiología». Pero también tiene una desventaja: «El problema es que se ha hecho muy fácil emplearla».

Recomienda no entusiasmarse con la aleatorización mendeliana, un potente instrumento que debe emplearse adecuadamente. Con la acumulación de datos genéticos, han proliferado los estudios que se sirven de ella sin estar a la altura. Algunos se han basado en datos erróneos y otros no han contrastado lo suficiente los supuestos en los que se fundamenta. Ha llegado el momento de poner límites, reclaman numerosos expertos.

Davey Smith fue uno de los que pensaban que la epidemiología podría haber llegado a su fin. Fue coautor de un editorial en *International Journal of Epidemiology* en el que se remarcaba que los datos observacionales sobre posibles efectos nocivos o beneficiosos de las exposiciones ambientales fracasarían reiteradamente al examinar las intervenciones en ensayos clínicos aleatorizados.

Pocos años después de la publicación del artículo, su argumento se hizo patente con toda claridad en el estrepitoso fracaso del ensayo SELECT, de cien millones de dólares, que demostró que el consumo de suplementos de selenio no protegía del cáncer de próstata, pese a los cuantiosos datos epidemiológicos que indicaban lo contrario.

> **La reputación de la epidemiología se estaba poniendo en tela de juicio**

«Fue descorazonador, y la reputación de la epidemiología se ponía en tela de juicio», cuenta Davey Smith. Desde 1986 ya se había propuesto el empleo de la genética para mejorar las interpretaciones. Pero tal enfoque ganó terreno con el florecimiento de los estudios de asociación del genoma completo (GWAS, por sus siglas en inglés), que vinculan variantes genéticas con rasgos específicos. En 2018, Davey Smith recurrió a la aleatorización mendeliana para revisar la relación entre el selenio y el cáncer de próstata.

Los datos genotípicos de decenas de miles de varones desvelaron casi una docena de variantes genéticas que se asociaron a concentraciones sanguíneas de selenio elevadas de manera natural. Estas personas habían vivido desde el nacimiento como si tomaran suplementos de selenio. Se pudo comparar entonces la incidencia del cáncer de próstata en los portadores de estas variantes con la de un grupo de control sin ellas. De esta suerte, los investigadores lograban centrarse de lleno en los niveles de selenio y mantener a raya la influencia de factores del modo de vida, como una dieta saludable, que podrían afectar tanto a las concentraciones de selenio como al riesgo de cáncer. Puesto que la tendencia a presentar cifras altas o bajas de selenio quedaba determinada por el ADN, disminuían las dificultades analíticas debidas a la causalidad inversa, esto es, la posibilidad de que las etapas iniciales del cáncer de próstata influyeran en la concentración de selenio.

El análisis no halló ningún beneficio del selenio, tal como había demostrado el ensayo SELECT.

ABUNDANCIA DE DATOS

Estos resultados sirven de fundamento para decidir si conviene emprender ensayos clínicos completos, según refiere Davey Smith. La aleatorización mendeliana permite contrastar hipótesis para las que no sería ético o práctico llevar a cabo un ensayo.

En principio, este tipo de análisis está indicado siempre que una variante genética muestre reproducir de forma natural los efectos de una exposición ambiental. Y cada año se descubren más de estas variantes; sobre todo, porque millones de personas de todo el mundo se prestan al análisis del genoma y el seguimiento de la salud. Esto dota a los genetistas de la potencia estadística suficiente para identificar asociaciones genéticas con cualquier cosa, desde el consumo de alcohol a los niveles de colesterol.

Epidemiólogos y otros científicos analizan cada vez más estos hallazgos mediante aleatorización mendeliana. Las bases de datos *Scopus* y *Web of Science* arrojan menos de 100 artículos sobre la materia publicados al año en 2010, que ascienden a unos 200 en 2015. En 2019, se emplea o comenta el método en más de 500 artículos. Se ha utilizado para abordar diversos interrogantes cuya interpretación suele verse dificultada por numerosas variables de la vida cotidiana. Los estudios han contribuido a demostrar de forma más categórica que el consumo de alcohol aumenta el riesgo de cáncer. En cambio, el colesterol bajo no lo hace, pese a algunas observaciones en sentido contrario.

Como excelente ejemplo de la utilidad del método que nos ocupa, muchos investigadores mencionan la miopía, un problema sanitario que está creciendo con rapidez [*véase* «La epidemia de la miopía», por Diana Kwon; MENTE Y CEREBRO n.º 80, 2016]. Es imposible examinar su relación con la educación mediante un ensayo aleatorizado controlado porque no es ético mantener deliberadamente sin escolarizar a un grupo de niños.

EN SÍNTESIS

Desde hace tiempo, la epidemiología no podía explicar ciertas observaciones que vinculan algunas exposiciones ambientales con problemas de salud.

La genética ha transformado el modo de distinguir la correlación de la causalidad mediante un novedoso método. Se trata de la aleatorización mendeliana, que se sirve de variantes genéticas para indagar sobre la causa y el efecto en los datos epidemiológicos.

No obstante, hay el peligro de emplear en exceso el método, que no siempre es aplicable debido a posibles sesgos en las variantes genéticas.

Surgió la posibilidad de emplear la aleatorización mendeliana en este campo en 2016, tras la publicación de dos GWAS independientes: uno en busca de rasgos genéticos relacionados con el nivel educativo; otro para detectar genes asociados a la miopía. Los estudios examinaron a cientos de miles de personas y hallaron numerosas variantes genéticas sólidamente relacionadas con la miopía y los años de escolaridad.

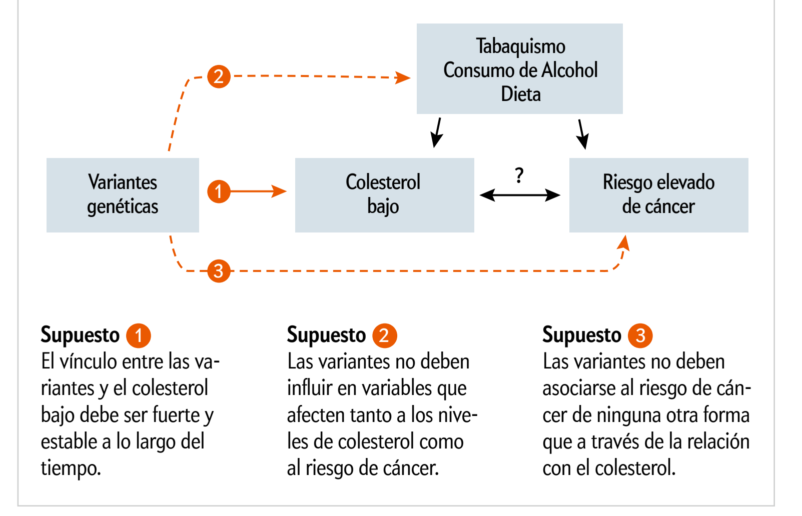
Al año siguiente, los epidemiólogos exploraron con estas variantes una de las series más grandes de datos poblacionales: 488.000 personas de edad mediana y avanzada apuntados al proyecto del Biobanco del Reino Unido. Se analiza el genoma de los voluntarios, que también responden preguntas sobre multitud de aspectos personales, entre ellos, la educación y la vista. Investigadores de las Universidades británicas de Cardiff y Bristol analizaron los datos mediante aleatorización mendeliana y averiguaron que la propensión genética a la miopía no influía en el número de años de escolaridad. En cambio, los portadores de genes asociados al éxito educativo eran significativamente más proclives a la miopía.

Ya sea por el tiempo dedicado a la lectura, menor iluminación natural u otro factor, los años pasados en el colegio influyen claramente en la visión, afirma Denize Atan, la oftalmóloga de Bristol que dirigió el proyecto. El vínculo es tan fuerte, señala, que legisladores y centros docentes deben trabajar para hacerle frente.

EL NUEVO MÉTODO

Los genes como variables indirectas

La aleatorización mendeliana se sirve de variantes genéticas para indagar sobre la causa y el efecto en los datos epidemiológicos. Intenta averiguar, por ejemplo, si tener el colesterol bajo aumenta el riesgo de cáncer (como algunos sugieren) mediante el examen de personas predispuestas genéticamente a presentar concentraciones reducidas del lípido. Esta estrategia contribuye a descartar la causalidad inversa (que el cáncer disminuye el colesterol) y permite evitar variables que podrían influir tanto en el riesgo de cáncer como en el colesterol. Sin embargo, se basa en diversos supuestos que es necesario poner a prueba.



SECRETO A VOCES

Según sostienen los críticos, no todos los estudios de aleatorización mendeliana son tan sólidos. «Antes de empezar, es preciso contar con una hipótesis robusta y datos que la respalden», comenta Atan, y añade que cada vez son más los que no lo hacen. «Uno se pregunta de dónde salen las ideas; parece que las sacan de la chistera.» Ello supone un gran problema, pues este método permite que los investigadores busquen, encuentren y publiquen relaciones entre series de datos con los que no están familiarizados y sin tener conocimientos especializados sobre el campo de interés.

En palabras de Sonja Swanson, epidemióloga del Centro Médico de la Universidad Erasmus de Rotterdam, «no cuesta nada dar a los botones y decir “he aquí una respuesta numérica a mi pregunta”».

En el campo de la epidemiología es un secreto a voces que muchos estudios de aleatorización mendeliana publicados son problemáticos. «Es muy fácil publicar artículos», señala Davey Smith. «Algunos trabajos de pésima calidad son de investigadores que no entienden los principios epidemiológicos.» En 2016, uno de estos estudios afirmaba haber descubierto que las concentraciones sanguíneas elevadas de proteína C reactiva, una enzima hepática asociada a la inflamación, causaban esquizofrenia. Apuntaba que los fármacos que reducían los niveles de esta sustancia en sangre podrían servir para tratar a las personas afectadas. El grupo de Davey Smith y otros efectuaron análisis similares y hallaron que, en realidad, la proteína C reactiva ejercía un efecto protector contra la esquizofrenia. Arguyeron que el grupo inicial no había combinado de manera adecuada las series de datos genéticos y, finalmente, el artículo de 2016 fue retirado.

Los epidemiólogos también han criticado los análisis de aleatorización mendeliana que aseveran haber descubierto que fumar durante el embarazo reduce drásticamente el peso del recién nacido y aumenta de forma considerable su riesgo de fisuras orofaciales.

El problema, explican, radica en que las variantes genéticas empleadas como medidas indirectas del tabaquismo se identificaron en lo que se conoce como estudios de genes candidatos, que evalúan un pequeño número de genes de los que se sospecha que intervienen en una conducta dada, como el tabaquismo. Los resultados de tales estudios son poco fiables por su sesgo hacia la búsqueda de ciertos efectos en los genes examinados. Las variantes que utilizaron estos autores en su aleatorización mendeliana no se han corroborado en GWAS de mayores dimensiones y más completos.

El director de esos proyectos sobre tabaquismo, George Wehby, investigador en política sanitaria de la Universidad de Iowa, aclara que el trabajo se realizó antes de que se dispusiera de mejores datos. «Admito que no serían variantes de elección, a la vista de lo que se conoce hoy día acerca de la genética del tabaquismo gracias a GWAS extensos», añade.

CONTRA EL SENTIDO COMÚN

Para un economista, la aleatorización mendeliana se parece mucho al análisis de variables instrumentales, en el que se pretende desentrañar relaciones ocultas entre dos observaciones mediante una variable que se toma como instrumento. «El hecho

de que los epidemiólogos estuvieran empleando genes como variables instrumentales nos despertó gran curiosidad, pero también desconfianza», relata Koellinger. Estos análisis se basan en unos supuestos que exigen un minucioso examen.

Un supuesto fundamental de la aleatorización mendeliana es que las variantes genéticas no deben afectar al resultado de ninguna otra forma. Por ejemplo, existe una variante del gen que codifica la enzima aldehído deshidrogenasa (ALDH2) que altera el metabolismo del alcohol. Cuando los portadores de esta variante beben, suelen sentir náuseas, por lo que se asocia a una menor ingesta de alcohol. Así pues, podríamos plantearnos emplearla para examinar si consumir bebidas alcohólicas eleva la presión arterial, ya que las personas con esta variante en general beben menos que las que no la portan.

Ahora bien, la ALDH2 también influye sobre la probabilidad de que una persona fume, que, a su vez, repercute de forma independiente en la presión arterial. Este fenómeno, llamado pleiotropía genética, puede invalidar los resultados de la aleatorización mendeliana y supone un obstáculo, puesto que no se conoce por completo su magnitud en numerosos genes.

Otra suposición es que la variante genética en cuestión ejerce un efecto intenso. Pero esta se va haciendo más difícil que se cumpla a medida que los GWAS de mayor tamaño y potencia revelan vínculos genéticos más débiles con distintos rasgos.

En 2015, una revisión de 178 estudios de aleatorización mendeliana puso de manifiesto que menos de la mitad analizaron suficientemente estos supuestos. Los epidemiólogos que la llevaron a cabo destacan la importancia de analizarlos en el contexto de cada trabajo, ya que resultan cruciales para la validez de este tipo de estudios.

Por otro lado, la aleatorización mendeliana está supeditada a una fuente de sesgo inequívoca, que es cuestión de vida o muerte. El hecho de que solo se muera una vez complica, por ejemplo, el análisis de las muertes por ictus. Puesto que estas tienden a producirse en personas de edad avanzada, los estudios de ictus incluyen por lo general a personas que han sobrevivido a las enfermedades propias de los más jóvenes, como las de corazón. Debido a que el ictus y las cardiopatías tienen causas comunes, como el colesterol elevado (y, en consecuencia, tratamientos comunes, como las estatinas), este sesgo del superviviente puede generar resultados erróneos.

Para demostrar los efectos de este sesgo, Mary Schooling, epidemióloga de salud pública en la Universidad de la Ciudad de Nueva York, realizó pruebas de aleatorización mendeliana en las que variantes genéticas asociadas a colesterol bajo reemplazaron el empleo de estatinas. Las personas con esta beneficiosa herencia padecen menos ataques cardíacos en edades tempranas y viven hasta la etapa de la vida en la que aumenta el riesgo de ictus. Por consiguiente, el estudio llegó a la conclusión de que las estatinas que reducen el colesterol serían en realidad causantes de ictus.

«No tenía sentido», comenta Schooling. Los ensayos aleatorizados y controlados adecuados no se equivocan de esa manera: indican que las estatinas protegen del ictus. Pero la aleatorización mendeliana muestra un sesgo del superviviente que es preciso identificar y contrarrestar.

ELIMINACIÓN DE SESGOS

«Todos los métodos implican sesgos», advierte Davey Smith. Y aclara que la aleatorización mendeliana no pretende sustituir a los ensayos aleatorizados controlados, sino que, junto con otras fuentes, incluidos los estudios observacionales, se suma a los datos disponibles para facilitar la toma de decisiones fundadas. En la actualidad se buscan formas de mejorarla.

Una de ellas es la identificación y resolución de sesgos, así como la aplicación de instrumentos estadísticos para poner a prueba la solidez de los supuestos. Davey Smith cita trabajos que permiten a los investigadores evaluar por sí mismos la calidad de los estudios de aleatorización mendeliana.

También resulta útil organizar mejor los datos. Los análisis sin sesgos presuponen que los genes se distribuyen aleatoriamente, pero algunos genes se concentran en ciertas regiones geográficas. Así, ya se han presentado series de datos genotípicos agrupados por familias ampliadas y los estudios de aleatorización mendeliana efectuados con ellos han detectado, por ejemplo, que la altura y el índice de masa corporal no influirían tanto en el éxito educativo como daban a entender los estudios anteriores.

Al comparar los resultados de los estudios basados en familias con los de los realizados en poblaciones, los genetistas contribuyen a diferenciar el papel de la herencia y del ambiente en un rasgo concreto. «Ciertos genes se asocian a determinadas características del entorno local. Y si se desea emplear genes en inferencias causales, es preciso romper ese vínculo», advierte Koellinger.

Esta clase de precisión es importante para que los científicos orienten el creciente torrente de información genética hacia recomendaciones de índole sanitaria y normativa. Pero aún es necesario mejorar y complementar estos instrumentos.

Las observaciones que efectuó Ware hace 200 años sobre la vista de estudiantes y soldados se han explicado gracias a una lente genética que nadie podía imaginar entonces. Irónicamente, tuvo que pasar otro siglo hasta que el Ejército británico aceptara reclutas que necesitaban gafas y cambiara sus criterios sobre lo que consideraba una visión suficiente. Durante la Primera Guerra Mundial, algunas autoridades esgrimían que no importaba si «un soldado británico no veía con claridad a lo que disparaba, siempre que apuntara en la dirección correcta».

Los instrumentos estadísticos de la epidemiología están mejorando. Y aunque la aleatorización mendeliana no siempre ofrece una claridad perfecta, podría, por lo menos, señalar la dirección correcta a los investigadores. IyC

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 576, págs. 196-199, 2019. Traducido con el permiso de Nature Research Group © 2019

Con la colaboración de nature

PARA SABER MÁS

Effect of selenium and vitamin E on risk of prostate cancer and other cancers. The Selenium and Vitamin E Cancer Prevention Trial (SELECT). Scott M. Lippman et al. en *JAMA*, vol. 301, n.º 1, págs. 39-51, enero de 2009.

Two-sample Mendelian randomization: Avoiding the downsides of a powerful, widely applicable but potentially fallible technique. Fernando Pires Hartwig et al. en *International Journal of Epidemiology*, vol. 45, n.º 6, págs. 1717-1726, marzo de 2017.

Education and myopia: assessing the direction of causality by mendelian randomisation. Edward Mountjoy et al. en *The BMJ*, vol. 361, k2022, abril de 2018.

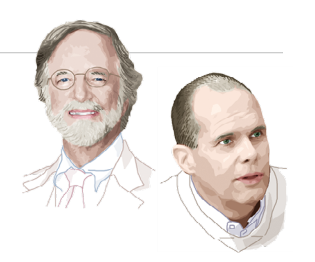
Bias from competing risk before recruitment in Mendelian randomization studies of conditions with shared etiology. C. Mary Schooling et al. en *bioRxiv*, julio de 2019.

EN NUESTRO ARCHIVO

Causalidad y epidemiología. Alfredo Morabia y Miquel Porta en *IyC*, julio de 2008.

por Nicholas A. Robinson y Christian Walzer

Nicholas A. Robinson es gobernador ejecutivo del Consejo Internacional de Derecho Ambiental y **Christian Walzer** es director ejecutivo de salud del Programa de Conservación Global de la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre.



Cómo evitar una nueva epidemia

En la prevención de un virus emergente hemos de tener en cuenta las complejas interconexiones entre las especies, los ecosistemas y la sociedad humana

Mientras el mundo actúa con urgencia frente a la COVID-19, no podemos ser cortos de miras. Es el momento de proceder también a la prevención de futuros brotes zoonóticos.

La salud de toda la vida del planeta está conectada. El brote de COVID-19 nos lleva a recordar un hecho básico: la salud y el bienestar de los humanos, los animales, las plantas y el ambiente guardan una estrecha relación y sufren el hondo influjo de las actividades humanas. La salud supone algo más que la ausencia de enfermedades infecciosas; ha de incorporar factores sociales, evolutivos y ambientales, así como las características y las conductas individuales. Por tanto, se necesita un enfoque multidisciplinar que integre y dé medios económicos a expertos en la salud de los animales, los ecosistemas y las personas.

Los coronavirus, como el nuevo SARS-CoV-2, no son infrecuentes. Los humanos y los animales albergan de forma natural y desplazan consigo una multitud de patógenos, entre ellos este tipo de virus. Los virus pueden infectar a sus portadores y hacer que enfermen e incluso mueran. Pero estos también pueden permanecer asintomáticos y convertirse en «hospedadores reservorio».

La OMS calcula que alrededor del 60 por ciento de los virus que afectan a las personas proceden de los animales. Y que este fenómeno, denominado «zoonosis», es responsable del 75 por ciento de las enfermedades infecciosas aparecidas en la última década.

¿Cómo podemos prevenir la emergencia de un nuevo virus? ¿Qué daríamos hoy por haber impedido la pandemia del VIH, un lentivirus cuyo origen se ha atribuido al contacto humano con chimpancés y mangabéis grises infectados en el oeste de África? La epidemia de SARS de 2002 empezó por el contacto humano con un mamífero, la civeta, al que los murciélagos habían infectado con el coronavirus.

Viene bien recordar que los fenómenos zoonóticos no son sucesos que se producen una sola vez o que suceden solo en tierras lejanas. Los conocemos con los nombres de rabia, virus del Nilo Occidental, peste, salmonelosis, hantavirus o enfermedad de Lyme.

En nuestra relación con la vida silvestre influyen los cambios de uso de la tierra, actividades como la explotación maderera o la deforestación, la expansión de la agricultura y el comercio de animales salvajes. Todo ello altera la circulación normal de los virus y modifica la composición, la abundancia y la conducta de las especies que hacen de reservorios víricos, con un aumento de los contactos entre los animales portadores de virus y las personas.



GETTY IMAGES/LUOMAN/ISTOCK

Benjamin Franklin adivirtió en 1736 de que «una onza de prevención vale una libra de cura». Los virus que moran en animales salvajes pueden infectar a animales domésticos; de manera similar, las enfermedades del ganado pueden diezmar las últimas poblaciones salvajes.

Una buena parte del mundo sigue sin aplicar las normas sanitarias globales en la producción ganadera y en el comercio de animales y sus productos. El consumo y comercio a gran escala de animales salvajes no conoce norma alguna.

En octubre de 2019, semanas antes de que apareciese la epidemia en China, la Sociedad para la Conservación de la Vida Silvestre y el Gobierno alemán recomendaron que se actuase vigorosamente para fortalecer la salud global. Los principios de Berlín, para «un solo planeta, una sola salud, un solo futuro», establecen diez prescripciones para unas comunidades más sanas. Los Gobiernos de todos los niveles deberían adoptar esas normas.

Esperar a actuar hasta que una enfermedad infecta a una persona es llegar demasiado tarde. La COVID-19 se encuentra ahora en todo el planeta, y los responsables de la salud pública trabajan a destajo para detectar y seguir la trayectoria de los nuevos casos para aislarlos y tratarlos. Mientras los laboratorios gubernamentales y las empresas farmacéuticas corren para hallar una vacuna contra ese virus, no debemos perder el norte. Al contrario, debemos concebir enfoques adaptativos, holísticos y previsores para la detección, prevención, seguimiento y mitigación de patógenos emergentes, de modo que incorporen las complejas interacciones entre las especies, los ecosistemas y la sociedad humana, sin dejar de tener en cuenta los móviles económicos dañinos y las subvenciones nocivas.

Debemos hacer más para adelantarnos al siguiente brote de una enfermedad zoonótica. Para ello habrá que apoyar medidas a escala internacional para el cierre de los mercados de animales salvajes destinados al consumo humano; asimismo, deberá gastarse dinero en la vigilancia de la vida silvestre mundial.

Mientras atendemos con urgencia a los enfermos, tendremos que adoptar la visión de que no hay más que una sola salud y actuar para que sean mayores las inversiones destinadas a la infraestructura de la salud humana, del ganado, de los animales silvestres, de las plantas y de los ecosistemas. Y estas han de estar a la altura de lo crítica que es la amenaza de las enfermedades infecciosas para la vida de nuestro planeta. IyC

por Robert Gast

Los sinuosos afluentes del Amazonas

En la formación de sus meandros no influye solo el terreno plano, sino sobre todo los enormes aportes de sedimentos



Pocas corrientes de agua serpentean como el Yuruá. Este afluente del Amazonas figura entre los ríos más sinuosos de América del Sur. En línea recta, su nacimiento en los altiplanos peruanos dista unos 1000 kilómetros de su desembocadura en el río Amazonas. Sin embargo, debido a sus numerosos meandros, la longitud total del Yuruá supera el triple de esa distancia. En esta imagen tomada por el satélite Landsat 8 de la NASA se aprecia un segmento del río al este de la población brasileña de Eirunepé.

Por un lado, el terreno plano favorece su forma serpenteante. Por otro, también influye el gran volumen de sedimentos transportados por el río. Al acumularse parte del material en la orilla interna de la curva, la barra del meandro crece progresivamente y la corriente forma un arco cada vez más amplio. Así lo explicó un equipo de investigadores de la Universidad de Cardiff en *Nature Geoscience* tras analizar las imágenes de satélite de varios puntos de la cuenca del Amazonas tomadas a lo largo de tres decenios.

Cuando un meandro se curva tanto que sus extremos prácticamente se tocan, el agua suele buscar el camino más corto, un proceso que los expertos denominan avulsión. En esos casos, a menudo se origina un meandro abandonado que queda separado del río principal, como puede observarse en muchos puntos del Yuruá.

—Robert Gast es físico y redactor.

FUENTE: «SEDIMENT SUPPLY AS A DRIVER OF RIVER MEANDERING AND FLOODPLAIN EVOLUTION IN THE AMAZON BASIN». JOSÉ ANTONIO CONSTANTINE ET AL. EN *NATURE GEOSCIENCE*, VOL. 7, PÁGS. 899-903, NOVIEMBRE DE 2014. LAUREN DAUPHIN, OBSERVATORIO DE LA TIERRA DE LA NASA (*imagen*)



por Miguel Ángel Quintanilla

Miguel Ángel Quintanilla es catedrático emérito de lógica y filosofía de la ciencia en la Universidad de Salamanca y discípulo de Mario Bunge.



La filosofía científica de Mario Bunge

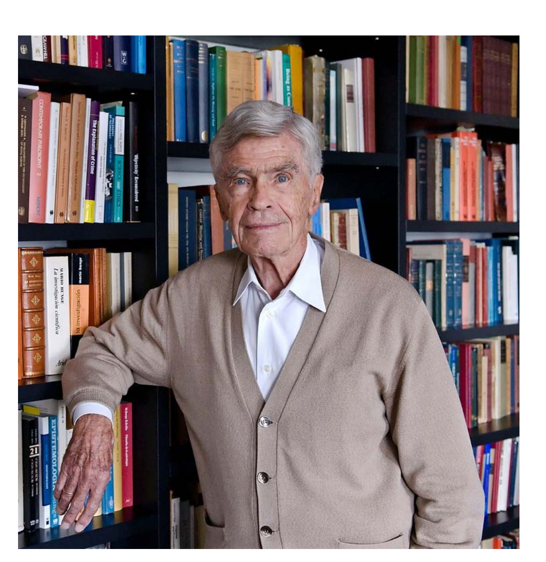
El legado de un pensador brillante que destacó por la amplitud de su obra, su originalidad y su compromiso con la ciencia y el progreso de la humanidad

El pasado 24 de febrero falleció en Montreal el científico y filósofo argentino-canadiense Mario Bunge, a la edad de cien años. Conocí a Bunge durante el IV Congreso Internacional de Lógica y Filosofía de la Ciencia, celebrado en Bucarest el año 1971. Acababa de presentar mi tesis doctoral sobre la epistemología de Karl Popper y estaba familiarizado con el manual de filosofía de la ciencia (*Scientific research*) que Bunge había escrito unos años antes. En esa tesis criticaba el sesgo idealista que apreciaba en la filosofía de Popper. En Bucarest comprobé que el propio Bunge había realizado una crítica demoledora de la teoría popperiana, que también él tachaba de idealista. Desde entonces he admirado la filosofía materialista, racionalista y crítica de Bunge y he tenido la suerte de poder disfrutar de su generosa amistad.

¿Cómo sintetizar en un breve texto la amplitud, originalidad y valor intelectual de las aportaciones de Bunge a la filosofía de nuestro tiempo? Podemos intentarlo si centramos la atención en su proyecto de hacer una filosofía científica.

La expresión «filosofía científica» no es muy común en los ambientes académicos de nuestros días. Se supone que las ciencias son campos de conocimiento perfectamente definidos, bien establecidos e independientes, y que la filosofía es una disciplina humanística, que ha ido cediendo terreno ante el avance de la ciencia, y refugiándose en cuestiones relativas a la propia tradición académica en vez de ocuparse de problemas vivos, planteados por la ciencia y la tecnología actuales.

Se puede reconocer, desde luego, la existencia de una zona común en la que ambas disciplinas se mantienen en contacto, como ocurrió de hecho en torno a la corriente principal de filosofía de la ciencia que floreció en el siglo XX. Allí podemos situar a figuras señeras del pensamiento universal como Bertrand Russell y Karl Popper o el movimiento del positivismo lógico, que se inició en el Círculo de Viena y que, tras el impacto de la obra de Kuhn (*La estructura de las revoluciones científicas*), dio paso al predominio de posiciones relativistas e irracionalistas en los años 70.



Sin embargo, al margen de esas zonas de contacto, se supone que el pensamiento científico tiene su propio valor independiente, justificado por los criterios de racionalidad y control experimental que impone el método de la ciencia. Frente él, la reflexión filosófica se limita a una labor de análisis lógico y epistemológico, o bien simplemente cede su terreno en los ámbitos en los que el conocimiento científico va abordando problemas y proponiendo teorías que, si tienen éxito, terminarán suplantando y descalificando a las teorías filosóficas. La mecánica de Newton sustituyó a la filosofía natural de los filósofos medievales, la biología molecular y la teoría darwinista de la evolución acabaron con las especulaciones filosóficas en torno a la naturaleza de los seres vivos, y la psiconeurobiología terminará con las especulaciones de la psicología precientífica o pseudocientífica.

Bunge es uno de esos grandes filósofos del siglo XX que aproximaron la reflexión filosófica al conocimiento científico y que destacaron por su originalidad, rigor, profundidad y compromiso con la ciencia. Y, sin embargo, es difícil encuadrar a Bunge en ninguno de los entornos académicos que destacaron en lo que hemos llamado la corriente principal de la filosofía de la ciencia del siglo XX. Para empezar, no era ni europeo ni angloamericano, sino argentino de nacimiento y canadiense de adopción. Tampoco era heredero del positivismo lógico, aunque en los ambientes académicos no vinculados a ese movimiento se le caracterizara usualmente como positivista, utilizando esta expresión como un reproche. Por otra parte, fue unos de los primeros y más sinceros admiradores de Popper, pero también uno de sus críticos más duros. Y su juicio sobre la obra de Kuhn fue siempre muy negativo, porque lo consideraba responsable del giro irracionalista que predominó en la filosofía de la ciencia a partir de los años 70.

Pero hay una forma más amplia de entender la zona de contacto entre filosofía y ciencia. Por una parte, se trata de señalar aquellos aspectos o componentes del pensamiento científico que tienen una

naturaleza intrínsecamente filosófica. Por otra, de recuperar y afrontar problemas y teorías filosóficas teniendo en cuenta los conocimientos científicos.

Ejemplos del primer tipo los encontramos en el análisis de conceptos como significado, verdad, teoría, causa, azar, entidad material, acontecimiento, proceso, mecanismo o probabilidad. Todos ellos forman parte de las ciencias particulares, pero requieren de la reflexión filosófica para ser entendidos de forma precisa y rigurosa. Y, a la inversa, hay muchos conceptos e ideas filosóficas (realidad, sustancia, mente o espíritu, sociedad, artefacto, riqueza, justicia) que es preciso reelaborar a la luz de los nuevos conocimientos que derivan de la investigación científica. El concepto de átomo fue durante siglos un concepto filosófico, pero hoy nadie podría construir una teoría filosófica de los átomos sin incorporar los resultados de la física. Igualmente nadie debería construir una teoría de la mente o de la conciencia sin incorporar los conocimientos de la neurociencia cognitiva. En este sentido más amplio (ideas filosóficas en la ciencia y conocimientos científicos relevantes para avanzar en la reflexión filosófica) es en el que se puede hablar de la contribución de Bunge a la filosofía científica.

La carrera académica de Bunge se desarrolló en Argentina, en el campo de la física teórica y de la filosofía de la física, con un enfoque original. A partir de 1959 empezó a enseñar filosofía de la ciencia, además de física, en la Universidad de Buenos Aires. Y ese mismo año publicó su primer libro de filosofía, en el que analizaba el principio de causalidad, el determinismo y la probabilidad en la ciencia.

Sus primeras publicaciones se ocuparon de los fundamentos de la física y, en especial, de la interpretación de la mecánica cuántica. Su análisis del concepto de causalidad y de la noción de azar objetivo en la ciencia tiene el doble mérito de la originalidad y de la consistencia interna frente a las interpretaciones más ortodoxas de la teoría cuántica. Bunge siempre criticó la carga subjetivista de la interpretación ortodoxa (o de Copenhague), que veía como una teoría que se refiere a operaciones de medición o a probabilidades subjetivas. Frente a esto, él planteaba una interpretación objetiva del formalismo de la mecánica cuántica como una teoría referida a un tipo de entidades que proponía llamar *cuantones* y que no se pueden caracterizar con las categorías usuales de la mecánica clásica (posición y momento clásicos, dualidad onda-partícula), pero sí describir en términos estocásticos y objetivos, independientes del observador.

La filosofía de la física fue siempre un motivo recurrente en las preocupaciones de Bunge. Pero no el único. A partir de los años 70 se embarcó en la titánica empresa de construir una filosofía científica, sistemática y completa, que fue incorporando a su *Tratado de filosofía* (1974-1989) en ocho volúmenes dedicados a la semántica de la ciencia, la ontología, la filosofía de la física, la biología, la psicología, la filosofía de las ciencias sociales, la de la técnica y la filosofía moral. Señalaremos a continuación seis elementos principales de esta filosofía científica.

En primer lugar, el materialismo. Para Bunge, todo lo que es real es material, es decir, que está dotado de propiedades objetivas, vinculadas al espaciotiempo y que pueden sufrir cambios y alteraciones.

El segundo lugar lo ocupa el sistemismo: la realidad material está organizada en sistemas y cada sistema se caracteriza por sus componentes, estructura y entorno. Los sistemas materiales se organizan en diferentes niveles de realidad: físico, químico, biológico, social y técnico. La integración en un sistema conlleva la aparición de propiedades sistémicas que están ausentes de sus componentes. Un sistema social está formado por organismos vivos, de carácter biológico, pero hay propiedades características de los sistemas sociales que son irreducibles a propiedades biológicas.

En tercer lugar destacamos el realismo científico. La realidad existe independientemente de que alguien pueda conocer cómo es. A través de nuestra imaginación y guiados por el método científico, los humanos hemos podido desarrollar una forma de conocer aspectos de la realidad de forma objetiva, aunque siempre parcial y revisable.

El cuarto elemento fundamental en la filosofía científica de Bunge es el conceptualismo. La lógica y las matemáticas son un instrumento imprescindible para la construcción de teorías científicas o filosóficas, la representación de hechos y la demostración de teoremas, pero los objetos matemáticos son ficciones, construcciones conceptuales inventadas por el cerebro humano, con las que podemos representar y explicar parcialmente la realidad; no son parte de la realidad material.

La quinta idea es que las ciencias sociales, en especial la economía, la historia y la antropología deben adoptar una perspectiva materialista, realista y sistémica para madurar.

Y la sexta (y última en esta lista) es que la ética y la filosofía práctica deben apoyarse en una teoría de valores objetivos, compatible con la ciencia.

Además de filósofo, físico y científico, Bunge fue también un ciudadano comprometido con una visión progresista e ilustrada de la realidad social y de la política. En su juventud, en Argentina, fundó una universidad obrera que muy pronto fue clausurada por el Gobierno peronista. En los últimos años de su vida dedicó una buena parte de sus escritos, entrevistas y conferencias a articular una visión sistémica de lo que él llamaba la democracia integral, es decir, no solo política, sino también económica (socialismo de mercado) y cultural (igualdad de oportunidades de acceso a la formación).

Para terminar, puede ser ilustrativo recordar el principio fundamental de su filosofía moral: «disfruta de la vida y ayuda a vivir a los demás». No hay ideal moral más básico que el derecho a disfrutar de la vida, que conlleva el deber de evitar la guerra, la violencia y la extorsión. Y no hay deber más básico que el del altruismo como principio rector de nuestro comportamiento en sociedad.

Este es el legado de Bunge que deberíamos cultivar y acrecentar: construir una filosofía científica, y dedicar nuestro talento y nuestro esfuerzo a disfrutar de la vida y a ayudar a los demás para que puedan hacer lo mismo. Es lo que él hizo durante sus cien años de camino vital. Gracias. IyC

PARA SABER MÁS

Las ciencias sociales en discusión: una perspectiva filosófica. Mario Bunge. Editorial Sudamericana, 1999.

Filosofía política. Solidaridad, cooperación y Democracia Integral. Mario Bunge. Gedisa, 2009.

Tratado de filosofía. Mario Bunge. Gedisa, 2008-2012.

Entre dos mundos: Memorias. Mario Bunge. Gedisa-Eudeba, 2014.

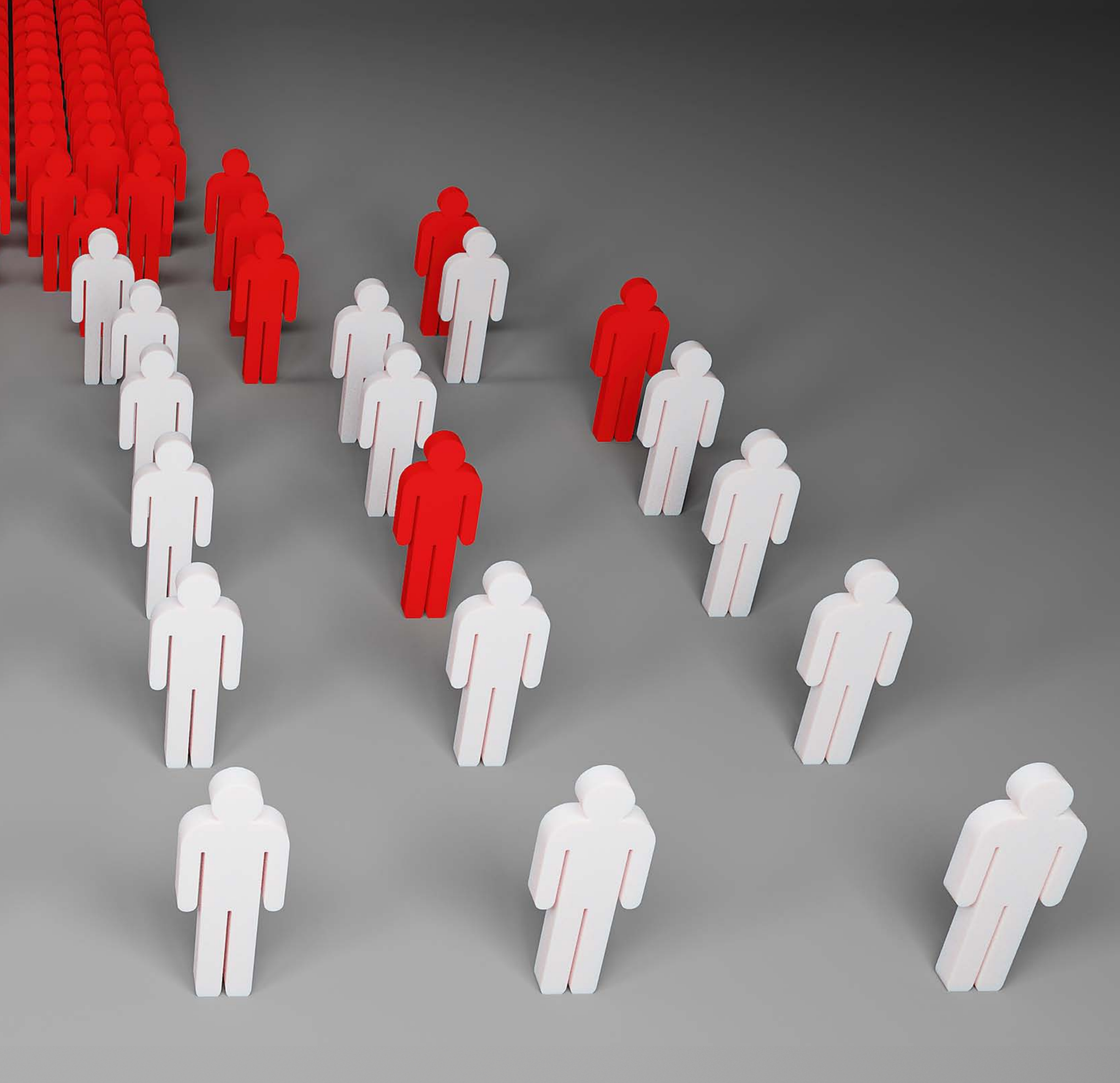
El último ilustrado. Homenaje al centenario del nacimiento de Mario Bunge. Antonio A. Martino. Eudeba, 2019.

Mario Bunge: A centenary Festschrift. Michael R. Matthews. Springer, 2019.



EPIDEMIOLOGÍA MATEMÁTICA

CÓMO MODELIZAR UNA PANDEMIA



Un modelo matemático propuesto hace un siglo y sus versiones modernas están ayudando a frenar la propagación de la COVID-19

Bartolo Luque, Fernando Ballesteros y Octavio Miramontes

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.

Fernando Ballesteros es físico y jefe de instrumentación del Observatorio Astronómico de la Universidad de Valencia. Autor de numerosos libros, su obra *Fractales y caos: La aventura de la complejidad* fue galardonada en 2016 con el Premio Prisma de divulgación científica.

Octavio Miramontes es físico e investigador del Instituto de Física de la Universidad Nacional Autónoma de México. Es experto en teoría de sistemas complejos.

La pandemia de COVID-19, provocada por el coronavirus SARS-CoV-2, constituye la crisis sanitaria global más seria a la que se ha enfrentado la humanidad desde la epidemia mundial de gripe de 1918. Al tratarse de un virus completamente nuevo para las personas, no disponemos de respuesta inmunitaria ni de vacuna para paliar sus efectos. Sin embargo, gracias a la experiencia previa con otras epidemias y a la guía de los modelos matemáticos, los Gobiernos de distintos países han puesto en marcha medidas de mitigación que, aunque rozan la distopía, se están traduciendo en un gran número de vidas salvadas.

La intención de este artículo es doble. Por un lado, queremos ilustrar cómo los modelos matemáticos pueden iluminar un área de la ciencia (la epidemiología, en este caso) hasta el extremo de resultar, no ya una simple herramienta de apoyo, sino fundamentales en su entendimiento. Y por otro, más importante en estos momentos, dotar al lector de un marco conceptual matemático para que pueda desarrollar su propio juicio sobre la evolución de la pandemia y las medidas que se están adoptando para paliarla.

Tal y como nos ha enseñado la actual pandemia de COVID-19, un brote epidémico puede comenzar con un «individuo cero»: el primer portador del virus. Este infectará después a otros, que, a su vez, contagiarán a más personas, lo que dará lugar a una reacción en cadena. ¿Podemos modelizar matemáticamente este proceso y predecir su evolución? Y, en tal caso, ¿podemos actuar para mitigar sus efectos?

La gran mortandad provocada por las enfermedades infecciosas ha sido motivo de investigación matemática desde el siglo XVIII. Pero hubo que esperar hasta 1927 para que el bioquímico William Ogilvy Kermack (1898-1970) y el médico Anderson Gray McKendrick (1876-1943) propusieran lo que hoy conocemos como el «modelo SIR» y derivaran uno de los resultados clave de la epidemiología: la existencia de un punto umbral que separa el crecimiento de una epidemia de su extinción. Este trabajo, junto con las investigaciones pioneras del médico Ronald Ross (1857-1932) y la matemática Hilda Hudson (1881-1965), marcaron el comienzo de la epidemiología matemática moderna. Y, a pesar de que desde entonces ha habido una explosión de modelos cada vez más complejos, la mayoría de ellos se basan en las ideas del modelo SIR, el cual sigue siendo capaz de dar cuenta de las nociones principales que describen la dinámica de una epidemia.

UN MODELO SENCILLO

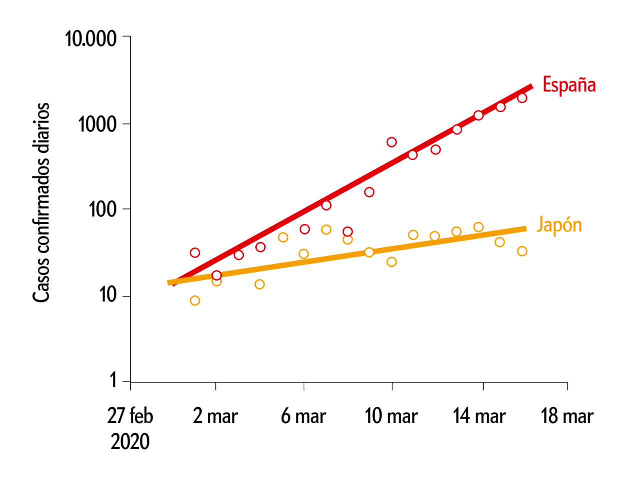
El modelo clásico de Kermack y McKendrick divide los N individuos de una población en tres clases de acuerdo con su estado epidemiológico. Por un lado tenemos a aquellas personas que no son inmunes y que, por tanto, se hallan en riesgo de contraer la infección. Este grupo de población suele denotarse mediante la letra S (del inglés *susceptible*, «vulnerable»). Cuando uno de estos individuos se contagia pasa a formar parte del grupo de infectados, I. Finalmente, una vez que estos se sobreponen integrarán el grupo de personas recuperadas, R, las cuales ya son inmunes y no pueden transmitir más la infección (de aquí las siglas SIR).

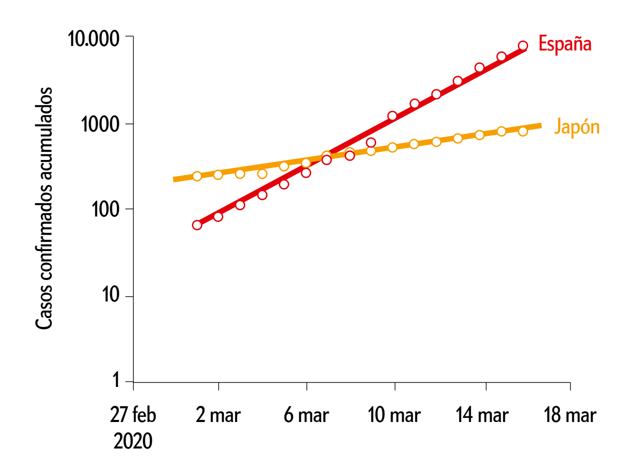
EN SÍNTESIS

La pandemia de COVID-19 ha obligado a tomar medidas drásticas en todo el mundo para frenar su propagación. Para evaluar la idoneidad de las distintas estrategias, los científicos deben primero modelizar la evolución de la enfermedad.

Varios de los fenómenos clave que rigen la dinámica de una epidemia, como la existencia de un pico en la curva de contagios o la aparición de la inmunidad de grupo, pueden entenderse a partir de un modelo matemático formulado en 1927.

Conocer los aspectos más sencillos de dicho modelo permite analizar la evolución de la pandemia actual, la eficacia de las medidas propuestas y los principios generales que guían la elaboración de modelos más complejos.





LA FASE INICIAL de la propagación de una epidemia queda descrita por un aumento exponencial en el número de casos. Estas gráficas representan, en escala semilogarítmica, la cantidad de infectados confirmados diarios (*izquierda*) y del total acumulado (*derecha*) entre los días 1 y 16 de marzo de 2020 en España (*rojo*) y Japón (*naranja*). Los puntos representan datos reales, mientras que las rectas corresponden al ajuste teórico. Los datos acumulados ($A(t)$, la suma del número de infectados $I(t)$ que se observa cada día), que siempre resultan menos ruidosos que los diarios, se ajustan a la función exponencial $A(t) = (I(0)/\alpha)e^{\alpha t}$, la cual tendrá el mismo exponente α que en los datos diarios. En ambas situaciones el crecimiento es efectivamente exponencial, como predice la teoría, aunque las pendientes para España y Japón son muy distintas: 0,32 y 0,085, respectivamente. Dicha diferencia se debe al distinto valor que toma en cada caso el número básico de reproducción, R_0, el cual puede entenderse como la cantidad de contagios que provoca de media cada persona infectada.

FUENTE DE LOS DATOS: CENTRO EUROPEO PARA LA PREVENCIÓN Y EL CONTROL DE ENFERMEDADES, WWW.ECDC.EUROPA.EU/EN/PUBLICATIONS-DATA/DOWNLOAD-TODAYS-DATA-GEOGRAPHIC-DISTRIBUTION-COVID-19-CASES-WORLDWIDE

En un instante de tiempo t, la población total de N individuos será siempre la suma de estos tres grupos, o compartimentos de población:

$$N = S(t) + I(t) + R(t).$$

El modelo SIR consiste en las ecuaciones que describen cómo cambia con el tiempo el número de personas pertenecientes a cada uno de estos grupos.

Consideremos ahora la siguiente pregunta: si el día t de la epidemia hay $I(t)$ personas infectadas, ¿cómo cambiará su número al día siguiente? Esquematicemos los posibles trasvases de individuos entre las tres clases como

$$S \rightarrow I \rightarrow R.$$

Por un lado, el número de infectados aumenta cuando los individuos en riesgo se contagian ($S \rightarrow I$). Supongamos que un individuo infectado tiene, en promedio, μ contactos al día (personas de su círculo familiar, amigos, compañeros de trabajo, etcétera). De ellas solo podrán contraer la infección una fracción $S(t)/N$ (el porcentaje de individuos en riesgo entre la población general). Por tanto, cada persona infectada tendrá de media $\mu S(t)/N$ encuentros diarios que podrán derivar en contagio. Dado que el número total de infectados es $I(t)$, a lo largo de ese día el número total de contactos potencialmente contagiosos vendrá dado por

$$I(t)\mu S(t)/N.$$

Si ahora suponemos que solo una proporción τ (con $\tau \leq 1$) de esos contactos resulta efectivamente en contagio, podemos concluir que el número de nuevos contagiados al día siguiente será

$$(\tau\mu/N)S(t)I(t).$$

Si definimos la constante $\beta = \tau\mu/N$, esta última expresión puede reescribirse como

$$\beta S(t)I(t).$$

Por otro lado, el número de infectados también disminuye cuando estos se recuperan ($I \rightarrow R$). Si suponemos que el tiempo medio de recuperación asciende a D días, cada día sanará una fracción $\gamma = 1/D$ de infectados. Así pues, el número total de infectados al día siguiente vendrá dado por

$$I(t + \Delta t) = I(t) + \beta S(t)I(t) - \gamma I(t),$$

donde $\Delta t = 1$ día.

La cantidad de individuos en cada grupo es un número natural. Pero si N es muy grande, podemos tratarlos como variables continuas y reescribir nuestra ecuación discreta (entre el día t y $t + 1$) como la siguiente ecuación diferencial:

$$I'(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{I(t + \Delta t) - I(t)}{\Delta t} \approx \beta S(t)I(t) - \gamma I(t).$$

Donde, aunque hayamos mantenido los mismos símbolos β y γ, ahora están divididos por Δt y, por tanto, se han convertido en las tasas de contagio y de recuperación, respectivamente. Así pues, la ecuación que acabamos de deducir nos dice a qué ritmo cambia la cantidad de personas infectadas en un momento dado en función del número de individuos en riesgo, $S(t)$, y el de los propios infectados, $I(t)$.

¿CRECIMIENTO O EXTINCIÓN?

Detengámonos un momento en esta primera ecuación del modelo SIR. En el caso de una epidemia como la de COVID-19, donde al comienzo del brote toda la población se encuentra en riesgo de contraer la enfermedad puesto que no hay individuos inmunes, tendremos que

$$S(0) = N.$$

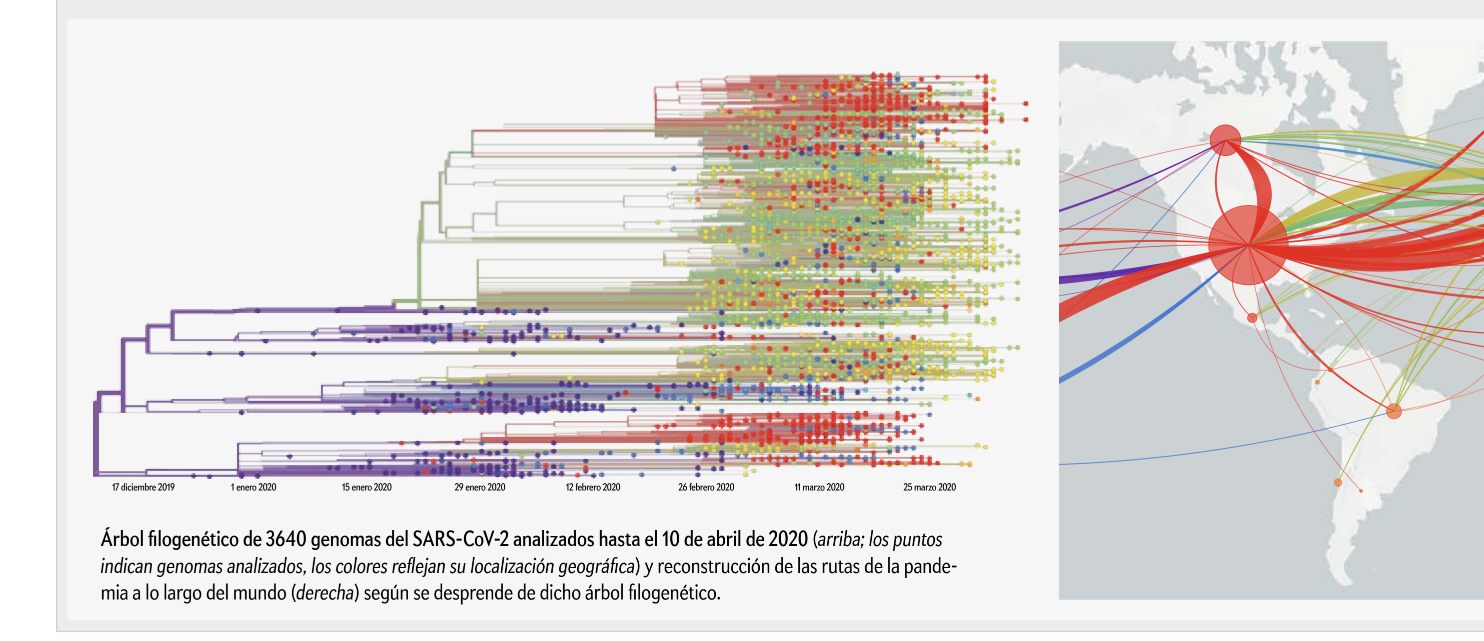
Es decir, al inicio de la epidemia ($t = 0$), el número de individuos en riesgo asciende a casi toda la población. Por tanto, podemos suponer que, durante las primeras etapas del proceso de contagio, el valor de $S(t)$ se mantendrá prácticamente

Las rutas del nuevo coronavirus

Los virus son entidades biológicas extremadamente simples: tan solo constan de material genético envuelto por una estructura protectora. Tanto en el SARS-CoV-2 como en otros virus, ese material genético es una cadena simple de ARN (en lugar de la cadena doble de ADN que guarda la información genética tanto en nuestra especie como en la mayor parte de los seres vivos). Al tratarse de una cadena simple y no tener una segunda cadena de respaldo, los virus de ARN son muy propensos a las mutaciones.

De hecho, su tasa de mutación puede ser hasta un millón de veces mayor que la de los mamíferos, lo cual significa que la diferencia genética entre el virus madre y su progenie puede ser mayor que la que hay entre nosotros y los australopitecos. Por esa razón, para caracterizar el genoma de una cepa vírica se usa un «genoma promedio». En el caso de los coronavirus, la buena noticia es que, pese a ser virus de ARN, su tasa de mutación es relativamente baja, lo que se debe a que poseen genes de reparación de las mutaciones. Gracias a ello, una vez superada la infección, la inmunidad adquirida por el paciente se mantendrá durante cierto tiempo... hasta que la acumulación de mutaciones en el patógeno haga que nuestro sistema inmunitario ya no lo reconozca y volvamos a ser propensos a una infección.

Con todo, las mutaciones en estos virus siguen siendo rápidas comparadas con las de organismos más complejos. Ello ha permitido determinar con bastante precisión la dinámica de esta pandemia, al secuenciar las diferentes cepas de SARS-CoV-2 a lo largo del mundo y trazar así su evolución geográfica y temporal más probable (*gráficas*).



Árbol filogenético de 3640 genomas del SARS-CoV-2 analizados hasta el 10 de abril de 2020 (*arriba; los puntos indican genomas analizados, los colores reflejan su localización geográfica*) y reconstrucción de las rutas de la pandemia a lo largo del mundo (*derecha*) según se desprende de dicho árbol filogenético.

constante. Esto nos permite simplificar enormemente nuestra ecuación diferencial, la cual se convierte en

$$I'(t) = (\beta S(0) - \gamma) I(t).$$

Dado que el factor multiplicativo es ahora constante, podemos integrar sin problemas esta ecuación para obtener la solución exponencial

$$I(t) = I(0)\, e^{(\beta S(0) - \gamma)t}.$$

Esta expresión nos aporta una información de enorme valor: si el exponente $\beta S(0) - \gamma > 0$, el número de infectados crecerá de manera exponencial. En cambio, si $\beta S(0) - \gamma < 0$, la cantidad de nuevos contagios declinará hasta extinguirse. De modo que existe un punto umbral entre la fase de crecimiento de la epidemia y la de extinción, el cual queda marcado por la condición $\beta S(0)/\gamma = 1$.

La existencia de este umbral epidémico está lejos de ser una obviedad. De hecho, ni la medicina ni la epidemiología habían imaginado dicho fenómeno: fueron los modelos matemáticos los que, por primera vez, iluminaron esta sorprendente característica de las epidemias. Y es precisamente en la existencia de este umbral donde radican las medidas de control.

El valor $R_e = \beta S(0)/\gamma$ se conoce como «número efectivo de reproducción», y solo si es mayor que 1 se producirá la epidemia. El «número básico de reproducción», el célebre R_0 que estos días llena las páginas de los periódicos, se define como el caso particular de R_e en el que la propagación del patógeno comienza con prácticamente toda la población en riesgo, como ha sido el caso de la COVID-19:

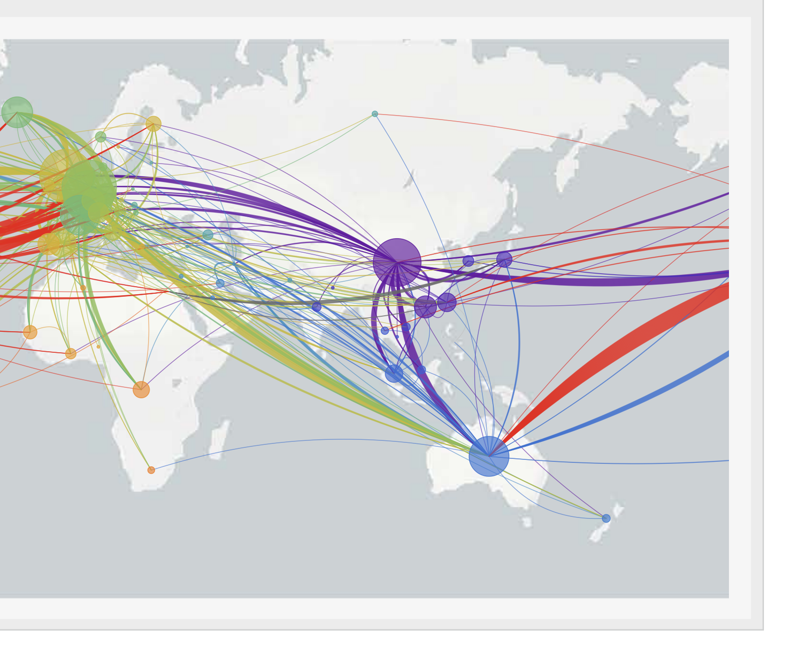
$$R_0 = \beta N/\gamma.$$

Si reescribimos R_0 en función de las definiciones originales de los parámetros β y γ, veremos que $R_0 = \tau\mu D$ (la probabilidad de contagio en un contacto, por el número medio de contactos diarios, por el número de días que se es contagioso), por lo que este parámetro se corresponde con la cantidad de contagios que provoca cada persona infectada desde que contrae el patógeno hasta que se recupera.

Si representamos nuestra función exponencial en escala semilogarítmica, obtendremos una recta de pendiente $\gamma(R_0 - 1)$

Los coronavirus son viejos conocidos. Hasta la fecha se han registrado 39 tipos, varios de ellos causantes de algunos de los catarros que todos hemos sufrido. Algunos han producido epidemias graves en el pasado, como la del síndrome respiratorio agudo grave (SARS) de 2003 o la del síndrome respiratorio de Oriente Medio (MERS) de 2012, con tasas de letalidad mayores que la asociada al nuevo coronavirus, si bien parece que este último es más contagioso.

El grado de transmisibilidad de una enfermedad se mide por su número básico de reproducción, R_0, el cual puede entenderse como un indicador de a cuántas personas en promedio contagia un infectado. Con los datos disponibles a principios de abril, para el SARS-CoV-2 este parámetro se estimaba entre 2 y algo menos de 5, aunque la mayoría de los expertos parecen coincidir en que su valor más probable rondaría 2,5.



(*véase la figura de la página 55*). Y dado que $\gamma = 1/D$, donde D representa el número medio de días transcurridos desde que una persona se infecta hasta que se repone, si disponemos de una estimación para D, podremos inferir un valor para R_0.

APLANAR LA CURVA

Vayamos ahora a la segunda incógnita de nuestro modelo: ¿cómo varía con el tiempo la cantidad de personas que se encuentran en riesgo de contraer la enfermedad, $S(t)$?

El número de individuos que componen este grupo solo puede disminuir, y lo hace a medida que sus miembros se van infectando: lo que pierde el compartimento $S(t)$ es lo que gana $I(t)$. Por tanto, dado que todas las cantidades y constantes que intervienen en nuestras ecuaciones son positivas, a partir de la ecuación para $I'(t)$ podemos deducir que

$$S'(t) = -\beta S(t) I(t).$$

La derivada de $S(t)$ es siempre negativa, por lo que el número de personas en riesgo solo decrecerá. La cantidad de infectados, sin embargo, aumentará mientras $\beta S(t)/\gamma > 1$, puesto que en tal caso $I'(t) > 0$. Pero, dado que $S(t)$ siempre disminuye, llegará un momento a partir del cual $\beta S(t)/\gamma < 1$, por lo que el número de infectados comenzará a decrecer. El instante en el que se produzca ese cambio de comportamiento, la epidemia habrá alcanzado el famoso pico de la curva del que todos hemos oído hablar estos días.

La última ecuación del modelo SIR, la que nos dicta cómo varía el número de individuos recuperados, se obtiene trivialmente a partir de las ecuaciones previas y de la condición $N = I(t) + S(t) + R(t)$:

$$R'(t) = \gamma I(t).$$

Nuestro sistema de ecuaciones diferenciales no puede resolverse de manera exacta. Pero, aun así, es posible extraer de él una gran cantidad de información.

Por ejemplo, podemos obtener algunas soluciones numéricas y representarlas para desarrollar nuestra intuición sobre cómo cambia la curva de infectados en función del número básico de reproducción (*véase la figura de la página 58*). Conocer este comportamiento es fundamental, ya que si se producen demasiados contagios al mismo tiempo, los hospitales se verán desbordados. En las gráficas vemos que el número máximo de infectados decrecerá cuanto menor sea R_0. De hecho, podemos calcular la relación exacta sin necesidad de resolver el sistema. Para ello basta con «dividir» las ecuaciones para $I(t)$ y $S(t)$, lo que nos da la expresión

$$dS/dI = \beta S/(\gamma - \beta S),$$

que, al integrarla, nos conduce a la siguiente identidad fundamental del modelo SIR:

$$I(t) + S(t) - (\gamma/\beta)\log S(t) = I(0) + S(0) - (\gamma/\beta)\log S(0).$$

Notemos ahora que el valor máximo de $I(t)$, $I_{\text{máx}}$, se alcanza en el instante $t_{\text{máx}}$ en el que su derivada se anula. En virtud de la ecuación diferencial para $I(t)$, vemos que esto ocurre cuando $S(t_{\text{máx}}) = \gamma/\beta$. Sustituyendo estos valores en la identidad fundamental y tomando $S(0) = N$ e $I(0) = 0$, llegamos a la expresión

$$I_{\text{máx}} = N(1 - (1 + \log R_0)/R_0),$$

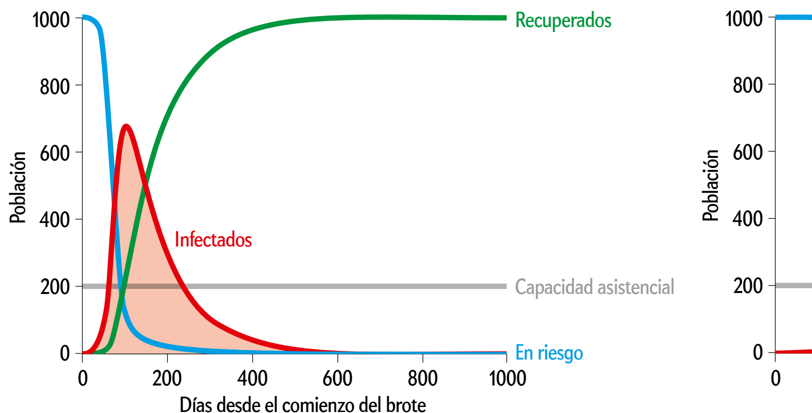
la cual nos permite ver cómo se reduce el pico máximo de la curva de infectados a medida que disminuye R_0.

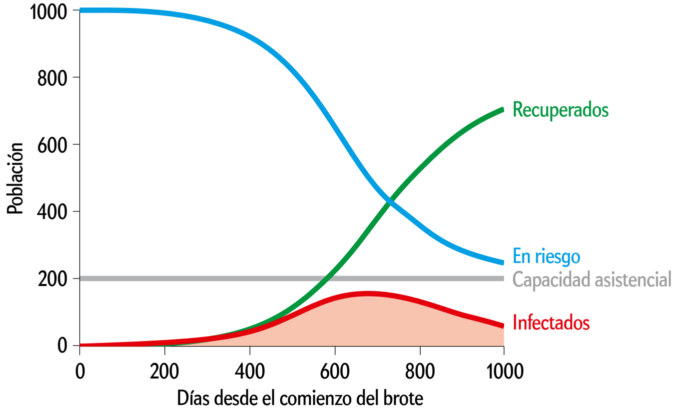
Es importante señalar que, durante una pandemia, R_0 puede tomar valores distintos, como por ejemplo nos muestran los datos de España y Japón. Hay muchos motivos por los cuales puede ocurrir esto. Algunos quedan fuera de nuestro control, como las mutaciones del propio virus. Pero, en otros casos, el responsable puede ser la dinámica social.

Recordemos que R_0 depende del número medio de contactos por persona (μ) y de la proporción de esos contactos que derivan en contagio (τ). Y en Japón, donde el contacto interpersonal es menor que en España y el uso de mascarillas está extendido, la velocidad de contagio ha sido menor. De hecho, al disminuir el número medio de encuentros entre individuos (que es justamente el objetivo que persiguen las medidas como el cierre de escuelas, la cancelación de grandes eventos o las cuarentenas, entre otras), el valor de R_0 decrece, lo que aplana la curva de infectados.

INMUNIDAD DE GRUPO

Podríamos pensar que, si se produce una epidemia y no se pone ningún remedio, toda la población acabará infectada, ya que si el fuego prende acabará quemando toda la madera.





LA EVOLUCIÓN DE UNA EPIDEMIA puede seguir pautas muy distintas en función del número básico de reproducción de la enfermedad, R_0. Estas gráficas muestran dos soluciones numéricas de las ecuaciones del modelo SIR para una población de $N = 1000$ habitantes, con las mismas condiciones iniciales ($I(0) = 1$, $S(0) = 999$) pero con valores de $R_0 = 10$ (*izquierda*) y $R_0 = 2$ (*derecha*). A medida que la población va infectándose (*rojo*), el número de personas en riesgo (*azul*) disminuye. Tras un retraso debido al tiempo típico de recuperación, la población de recuperados (*verde*) comienza a aumentar. Si la tasa de transmisión del patógeno es grande (*izquierda*), el número máximo de infectados será tan elevado que podrá superar la capacidad asistencial de los servicios sanitarios (*gris*, $N = 200$ en este ejemplo). En cambio, si se toman medidas que consigan reducir el número básico de reproducción, el crecimiento de la epidemia será menos explosivo y el número máximo de infectados resultará menor, lo que puede evitar el colapso de los hospitales.

Pero de nuevo, el modelo SIR nos enseña algo que no es obvio. Si volvemos a nuestra identidad fundamental y la particularizamos para t en el infinito (con $S(0) = N$, $I(0) = 0$ e $I(\infty) = 0$), tendremos

$$\log(S(\infty)/N) = -R_0(1 - S(\infty)/N).$$

La cantidad $1 - S(\infty)/N$ se conoce como «tasa de ataque», y representa la fracción de la población que finalmente se habrá infectado una vez que remita la epidemia.

¿Qué ocurre en un caso general? Cuanto menor sea la cantidad inicial de personas en riesgo, $S(0)$, menos población se infectará durante la epidemia. Esto es precisamente lo que ocurre cuando vacunamos a una fracción p de la población, algo que podemos incorporar fácilmente a nuestro modelo imponiendo que la cantidad inicial de «recuperados» sea $R(0) = pN$, ya que recordemos que los consideramos inmunes.

Vacunar a una proporción p de la población tiene el efecto de disminuir la fracción inicial de personas en riesgo hasta $S(0) = (1 - p)N$. Esto conduce a un cambio en el umbral epidémico, $R_e = \beta S(0)/\gamma = 1$, que ahora pasará a ser

$$\beta(1 - p)N/\gamma = 1.$$

En otras palabras: si inmunizamos a una fracción de la población superior a $p_c = 1 - 1/R_0$, habremos logrado evitar desde el principio el crecimiento de la epidemia [*para una demostración distinta de este mismo resultado, véase* «Las matemáticas de las epidemias (y de las vacunas)», por Patrick Honner, *en este mismo número*].

Observemos que p_c es siempre distinto de 1, por lo que no necesitamos vacunar a todos los individuos para proteger a toda la población. Esta propiedad es la célebre «inmunidad de grupo» que tan a menudo hemos oído mencionar estos días. Y al igual que el fenómeno de umbral, tampoco nadie la había deducido ni imaginado a partir de datos reales. Sin embargo, emerge de manera sencilla a partir de nuestro modelo matemático.

No obstante, cuanto mayor sea el número básico de reproducción, mayor será la cobertura de vacunación necesaria para lograr la inmunidad de grupo. Y por desgracia, muchas enfermedades infecciosas requieren porcentajes de vacunación demasiado elevados para poder alcanzarlos en la práctica. Para el sarampión y la rubeola, por ejemplo, las tasas críticas de vacunación calculadas a partir de sus respectivos valores de R_0 son del orden del 90 por ciento. Si a ello le sumamos que la eficacia de estas vacunas no es perfecta, sino que ronda el 95 por ciento, obtenemos unas tasas críticas de vacunación impracticables, del 99 y el 91 por ciento respectivamente. De hecho, la única enfermedad infecciosa humana que hasta ahora hemos sido capaces de erradicar en todo el mundo mediante vacunas ha sido la viruela.

En lo que respecta a la pandemia de COVID-19, por ahora no disponemos de vacuna. Sin embargo, estas mismas consideraciones revisten importancia para los individuos que pasen la enfermedad y acaben inmunizados. Si su porcentaje fuera superior al que dicta p_c (que para el caso de la COVID-19 se estima entre el 60 y el 75 por ciento de la población), habríamos alcanzado la inmunidad de grupo. En caso contrario, levantar las medidas de control a las que estamos sometidos actualmente (confinamiento, cierre de escuelas, etcétera) podría implicar un rebrote.

MODELOS DE JUGUETE

Toy models, «modelos de juguete», es el término que suele emplearse en inglés para modelos tan sencillos como el SIR. Suena un tanto despectivo, pero subrayemos que ni el umbral epidémico ni la relación entre el máximo de infectados o la tasa de ataque con el número básico de reproducción o la inmunidad de grupo eran conocidos por los epidemiólogos antes de la llegada de estos modelos.

Con todo, si queremos predecir cuantitativamente el curso de una epidemia real, deberemos tomar en consideración muchos más detalles. Una de las carencias más obvias del modelo

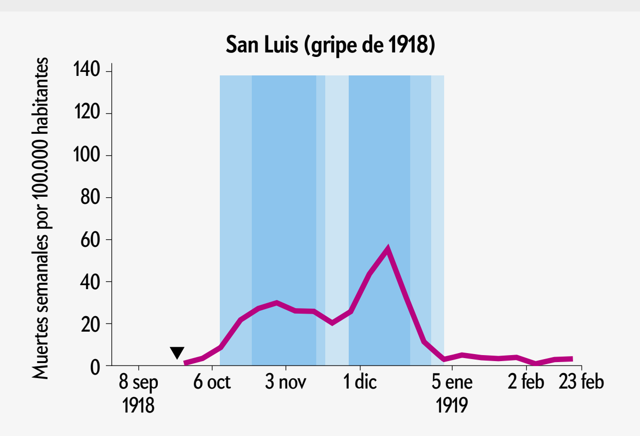


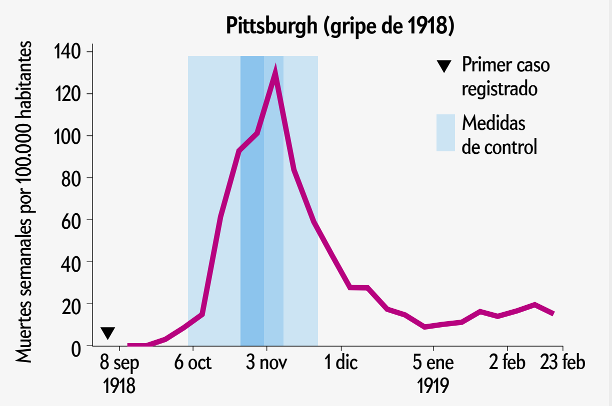
Lecciones de la gripe de 1918

Las estrategias de control epidémico que estamos viendo estos días, como el distanciamiento social o el confinamiento en casa, buscan reducir el número básico de reproducción de la enfermedad, R_0. Tales medidas han sido empleadas otras veces a lo largo de la historia; de hecho, con anterioridad al desarrollo de los modelos teóricos sobre epidemias. Un caso muy ilustrativo nos lo proporciona la pandemia de gripe de 1918, también conocida como «gripe española».

Aquella pandemia guardaba varias similitudes con la actual. No solo la enfermedad se contagiaba de la misma manera, sino que su R_0 estaba cercano a 2 y su tasa de letalidad (porcentaje de fallecimientos entre la población infectada) rondaba el 2 por ciento; números que, por lo que sabemos hasta ahora, resultan del mismo orden de magnitud que los asociados a la COVID-19. La mayor diferencia entre ambas epidemias es que la gripe española se cebó especialmente con la población de adultos jóvenes, mientras que la COVID-19 ha resultado mucho más peligrosa para la población de mayor edad. Con todo, ambas pandemias fueron similares en muchos aspectos, por lo que los medios adoptados hace un siglo para frenar el avance de aquella enfermedad permiten extraer valiosas lecciones para afrontar la situación actual.

En 2007 se publicaron dos trabajos que analizaban el éxito de las diferentes estrategias seguidas durante la pandemia de 1918 en 43 ciudades de Estados Unidos (*abajo*). Tales medidas nos sonarán mucho: mantener una mayor distancia social entre individuos, regular o prohibir actos colectivos (desde manifestaciones y mítines políticos hasta eventos en recintos cerrados, como teatros o iglesias), horarios comerciales escalonados, cierre de escuelas, uso de mascarillas, cuarentena de los afectados en sus casas... Sin embargo, estas medidas no se tomaron de forma uniforme en todo el país, sino que cada ciudad las implantó como consideró oportuno. Ello produjo una casuística variada que se tradujo en picos epidémicos muy distintos.

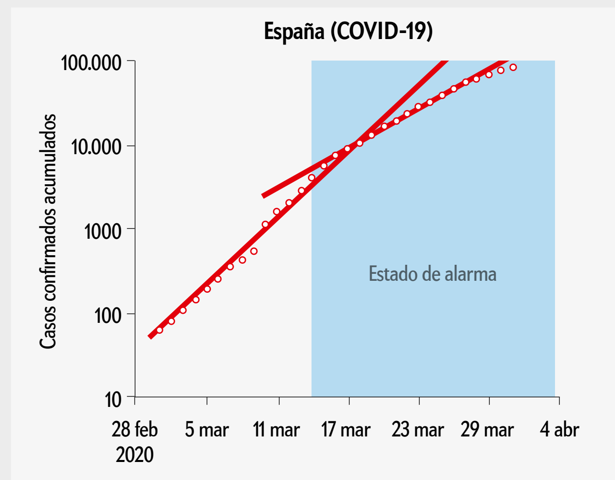




Muertes semanales por cada 100.000 habitantes atribuidas a la pandemia de gripe de 1918 en San Luis y Pittsburgh. Las zonas sombreadas marcan restricciones de distinto tipo (cierre de escuelas, cancelación de grandes eventos, etcétera); las zonas más oscuras indican la coincidencia en el tiempo de varias de esas medidas. Tras la aparición del primer caso, San Luis reaccionó antes que Pittsburgh y las medidas se prolongaron durante más tiempo, lo que se tradujo en un menor número de muertes.

Las conclusiones son bastante intuitivas: cuanto antes comenzaron las medidas de control, menores fueron los picos de muertes semanales, llegándose a alcanzar diferencias de hasta el 50 por ciento. También fue menor el total de muertes acumuladas, aunque en tal caso las diferencias fueron del 20 por ciento. Esa discrepancia entre porcentajes se debió a que, en muchos casos, cuando la epidemia comenzaba a remitir se levantaban las restricciones, lo que provocaba un segundo pico infeccioso: una lección que debe servir como advertencia a la hora de diseñar la intensidad y la duración de las medidas adoptadas para frenar la pandemia actual, así como la planificación del regreso gradual a la normalidad.

En cuanto la evolución de la COVID-19 en España (*derecha*), desde que se implantaron las medidas de confinamiento el pasado 14 de marzo, R_0 cambió y a los pocos días se observó un cambio de tendencia. El comportamiento seguía siendo exponencial, pero ahora con una pendiente asociada menor que la anterior. Si damos como bueno el valor de 2,5 para el R_0 previo a las medidas, el valor en los días posteriores descendió a 1,9; considerablemente menor, aunque aún mayor que el de la gripe estacional sin confinamiento.



Casos confirmados acumulados de COVID-19 en España (*puntos*) del 1 de marzo al 1 de abril de 2020, en escala semilogarítmica. La implantación de las medidas de control el 14 de marzo se tradujo pocos días después en una reducción de la pendiente (*rectas*).

FUENTES: «NONPHARMACEUTICAL INTERVENTIONS IMPLEMENTED BY US CITIES DURING THE 1918-1919 INFLUENZA PANDEMIC», HOWARD MARKEL ET AL. EN *JOURNAL OF THE AMERICAN MEDICAL ASSOCIATION*, VOL. 298, PÁGS. 644-654, AGOSTO DE 2007 (*pandemia de gripe de 1918*); CENTRO EUROPEO PARA LA PREVENCIÓN Y EL CONTROL DE ENFERMEDADES, WWW.ECDC.EUROPA.EU/EN/PUBLICATIONS-DATA/DOWNLOAD-TODAYS-DATA-GEOGRAPHIC-DISTRIBUTION-COVID-19-CASES-WORLDWIDE (*datos de la COVID-19 en España*)

SIR es que no tiene en cuenta la densidad ni la movilidad de la población. ¿Hablamos de una comunidad dispersa o de una gran ciudad? ¿Con qué frecuencia viajan los individuos de un lugar a otro?

Introducir tales elementos en los modelos puede modificar considerablemente las condiciones que marcan el umbral epidémico y otras cuestiones relativas a la propagación de la enfermedad. Los modelos que se están usando en estos momentos para entender y predecir la pandemia de COVID-19 incorporan espacio explícito y la movilidad recurrente de los individuos, están estructurados por grupos demográficos, tienen más compartimentos de población, etcétera. Además incluyen las características específicas conocidas hasta el momento de la COVID-19, como el tiempo que tardan en manifestarse los síntomas, el período de recuperación, la letalidad por edades y otros datos, todo lo cual permite explorar la idoneidad de las distintas estrategias de mitigación.

Uno de estos modelos es el elaborado por los físicos de sistemas complejos Alex Arenas, de la Universidad Rovira i Virgili de Tarragona, Jesús Gómez-Gardeñes, de la Universidad de Zaragoza, y sus colaboradores, quienes han estudiado la dinámica de la COVID-19 con datos de España, Portugal y Brasil. Recomendamos al lector interesado en más detalles la lectura del último trabajo referenciado en la bibliografía. Sin modelos como este, habríamos carecido de guía para enfrentarnos a la crisis y se hubieran perdido muchas más vidas.

MATEMÁTICAS Y SALUD PÚBLICA

Es posible que nunca en la historia las recomendaciones desprendidas de un modelo matemático hayan influido tanto y de manera tan inmediata en las políticas de salud pública de tantas naciones. La experiencia con pandemias anteriores nos ha enseñado que la manera más efectiva de frenar su propagación es el aislamiento de los individuos. Quiénes y por cuánto tiempo son preguntas que tienen una enorme trascendencia social por su impacto en los sistemas sanitarios, en la economía y en la propia vida.

Por ejemplo, los criterios del Equipo de Respuesta a la COVID-19 del Imperial College de Londres (uno de los varios grupos de investigadores que asesoran al Gobierno británico), liderado por el epidemiólogo Neil Ferguson, se fundamentan en un modelo matemático desarrollado por ellos mismos entre 2006 y 2008 para predecir la propagación de enfermedades infecciosas en Gran Bretaña y Estados Unidos. Un estudio publicado el 16 de marzo por este grupo estimaba el impacto de varias intervenciones en el sistema sanitario; en concreto, en la disponibilidad de unidades de cuidados intensivos (UCI). Dichas intervenciones eran el aislamiento en casa de los individuos infectados, el cierre de escuelas y universidades, y el distanciamiento social para mayores de 70 años o para toda la población. El objetivo era reducir el pico de demanda de los sistemas sanitarios ($I_{\text{máx}}$) y proteger la salud de las personas más vulnerables.

El trabajo dejó claro que la estrategia de no imponer restricciones para así favorecer el contagio generalizado y conseguir la inmunidad de grupo acarrearía una demanda de UCI unas 30 veces mayor a la disponible, lo que se traduciría en unas 500.000 muertes en el Reino Unido y 2,2 millones en Estados Unidos. Sin embargo, con una mitigación que combinase el aislamiento de los infectados con el distanciamiento social y el confinamiento en casa durante tres meses, el pico de la pandemia caería por debajo de los dos tercios de la capacidad máxima de las UCI y reduciría de manera considerable el número de muertes.

¿Están siendo efectivas las medidas de intervención que se han tomado finalmente? El 30 de marzo, el mismo grupo del Imperial College publicó los resultados de un modelo bayesiano que analizaba el impacto de las medidas de control impuestas en 11 países europeos. Dicho análisis concluía que todos los países habían logrado reducir el número efectivo de reproducción de la enfermedad y estimaba que, hacia finales de marzo, las estrategias de control habían logrado salvar unas 59.000 vidas, una cifra que solo en España ascendía a 16.000.

Otra de las grandes incógnitas de la actual pandemia de COVID-19 es la cantidad total de infectados, entre otras razones porque parece haber un gran número de personas infectadas pero asintomáticas. Una de las consecuencias de desconocer el número real de infectados es la dificultad de determinar la tasa de letalidad del virus; es decir, la probabilidad de morir en caso de infección. A ello se suma que el riesgo de fallecimiento varía de manera considerable a lo largo de la pirámide poblacional, siendo relativamente alto para los mayores de 70 años, mientras que los niños menores de 10 años parecen no verse prácticamente afectados.

Tanto el trabajo del Imperial College como muchos otros publicados por distintos grupos acaban con una última advertencia: Europa se encuentra aún lejos de la inmunidad de grupo, por lo que debemos ser extremadamente cautos con la vuelta a la normalidad, ya que, mientras no haya un número suficiente de personas inmunizadas, la amenaza de un rebrote continuará presente. IyC

PARA SABER MÁS

A contribution to the mathematical theory of epidemics. William Ogilvy Kermack y Anderson Gray McKendrick en *Proceedings of the Royal Society A*, vol. 115, págs. 700-721, agosto de 1927.

Strategies for mitigating an influenza pandemic. Neil M. Ferguson et al. en *Nature*, vol. 442, págs. 448-452, abril de 2006.

Modeling targeted layered containment of an influenza pandemic in the United States. M. Elizabeth Halloran et al. en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 105, págs. 4639-4644, marzo de 2008.

Impact of non-pharmaceutical interventions (NPIs) to reduce COVID-19 mortality and healthcare demand. Equipo de Respuesta a la COVID-19 del Imperial College, 16 de marzo de 2020. Disponible en **www.imperial.ac.uk/mrc-global-infectious-disease-analysis/covid-19/report-9-impact-of-npis-on-covid-19**

Estimating the number of infections and the impact of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in 11 European countries. Equipo de Respuesta a la COVID-19 del Imperial College, 16 de marzo de 2020. Disponible en **www.imperial.ac.uk/mrc-global-infectious-disease-analysis/covid-19/report-13-europe-npi-impact**

Risk map for the spread of COVID-19. Álex Arenas et al. Disponible en **covid-19-risk.github.io/map**

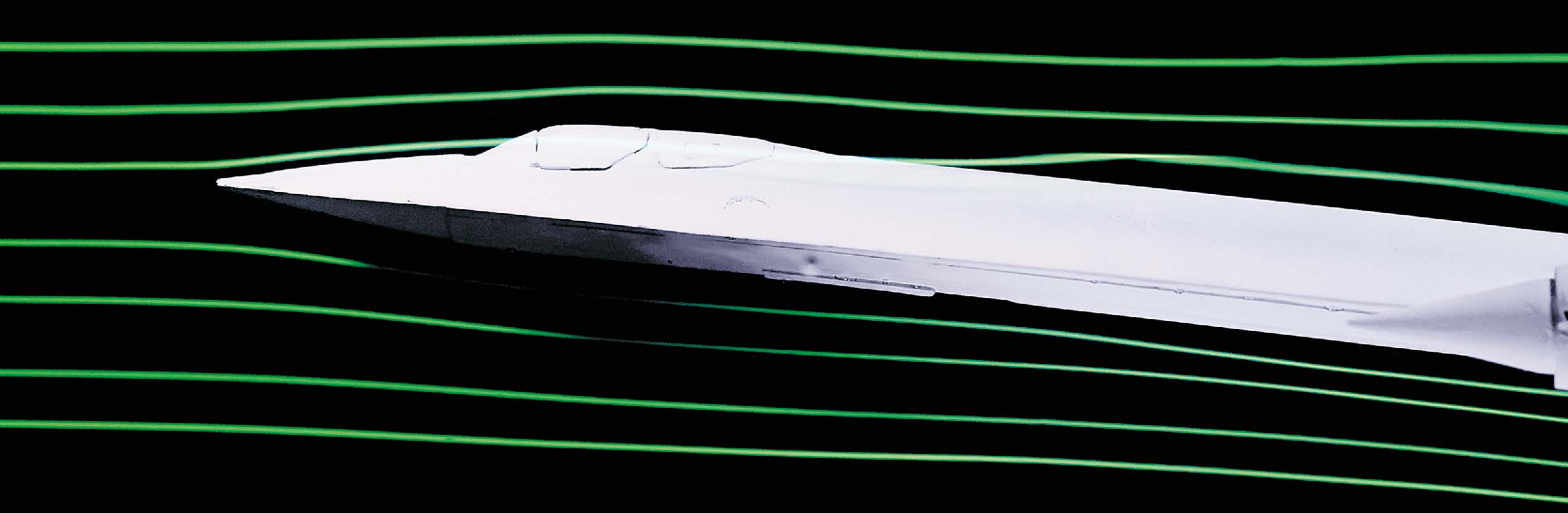
Derivation of the effective reproduction number R for COVID-19 in relation to mobility restrictions and confinement. Alex Arenas et al., medRxiv 2020.04.06.20054320, 8 de abril de 2020. Disponible en **doi.org/10.1101/2020.04.06.20054320**

EN NUESTRO ARCHIVO

Modelos de propagación de enfermedades. Joan Saldaña en *IyC*, octubre de 2013.

Prever la próxima pandemia. Alessandro Vespignani en *IyC*, julio de 2018.

Las matemáticas de las epidemias (y de las vacunas). Patrick Honner, *en este mismo número.*



FÍSICA

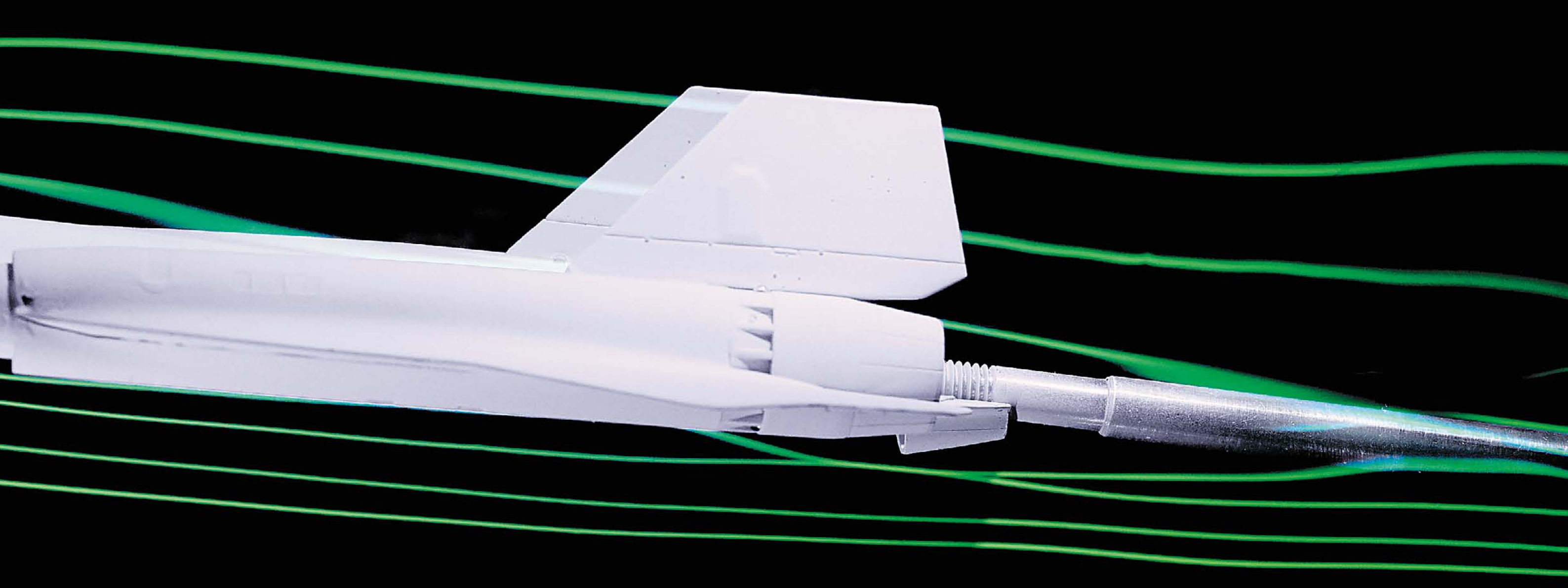
El enigma de la sus

No hay ninguna teoría que explique completamente por qué los aviones se mantienen en el aire

Ed Regis

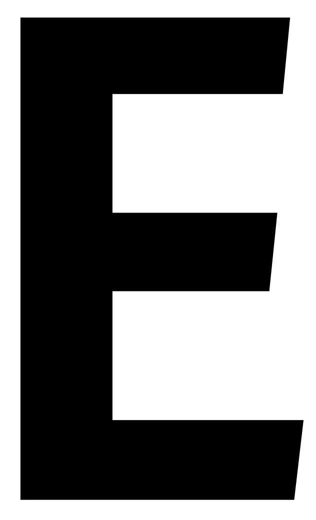
Fotografías de Ian Allen

LÍNEAS DE CORRIENTE teñidas interaccionando con un avión a escala en un túnel de agua del Laboratorio de Mecánica de Fluidos del Centro de Investigación Ames de la NASA.



tentación aerodinámica


Ed Regis es escritor científico. Entre sus libros se encuentran *¿Quién ocupó el despacho de Einstein?* (Anagrama, 2006) o *¿Qué es la vida?* (Espasa, 2009). Además, acumula más de 1000 horas de vuelo como piloto privado.



EN DICIEMBRE DE 2003, EL *NEW YORK TIMES* PUBLICÓ UN ARTÍCULO TITULADO «Permanecer en lo alto: ¿Qué los mantiene ahí arriba?» para conmemorar el centenario del primer vuelo de los hermanos Wright. Su intención era responder a una sencilla pregunta: ¿cómo se mantienen los aviones en el aire? Para ello, acudieron a John D. Anderson, conservador de la sección de aerodinámica del Museo Nacional del Aire y del Espacio de EE.UU. y autor de varios libros sobre el tema.

Sin embargo, lo que dijo Anderson es que en realidad no existía un consenso sobre qué genera la fuerza aerodinámica que conocemos como sustentación. «No hay una respuesta simple y concisa a esta cuestión», declaró al *New York Times*. La gente da distintas contestaciones y algunos defienden la suya con «fervor religioso». Más de quince años después de esta afirmación, sigue habiendo distintas explicaciones del fenómeno, cada una con su séquito de entusiastas defensores. A estas alturas de la historia de la aviación, esta situación resulta un tanto desconcertante. Después de todo, los mecanismos naturales de la evolución, operando de forma mecánica y aleatoria, consiguieron resolver hace eones el problema de la sustentación aerodinámica para el planeo de las aves. Así que ¿por qué nos resulta tan difícil explicar qué mantiene a los pájaros (y a los aviones) en el aire?

Un elemento que contribuye a la confusión es que hay dos niveles diferentes de abstracción en las explicaciones de la sustentación: el técnico y el no técnico. Aunque son más complementarios que contradictorios, difieren en sus objetivos. El primer nivel conforma una teoría estrictamente matemática, un dominio donde el análisis se basa en ecuaciones, símbolos, simulaciones por ordenador y números. No hay demasiadas discrepancias, si es que hay alguna, sobre cuáles son las ecuaciones apropiadas o sus soluciones. El objetivo de esta descripción técnica es realizar predicciones precisas y obtener resultados que les sean útiles a los ingenieros aeronáuticos que se dedican al complejo problema de diseñar aeronaves.

Pero ni las ecuaciones ni sus soluciones son explicaciones en sí mismas, y existe un segundo nivel de análisis no técnico que pretende proporcionar una explicación física y cualitativa de la sustentación. En este caso, se trata de alcanzar una comprensión intuitiva de las fuerzas y factores reales que consiguen mantener los aviones en el aire. Este enfoque no recurre a números y ecuaciones, sino a conceptos y principios que les resultan familiares e inteligibles a los no especialistas.

Es precisamente en este segundo nivel no técnico donde surgen las controversias. Disponemos de dos teorías alternativas para explicar la sustentación, y los partidarios de cada una de ellas defienden sus puntos de vista en artículos y libros, y también en Internet. El problema es que ambas teorías son correctas, pero ninguna ofrece una explicación completa de la sustentación aerodinámica, que dé cuenta de las fuerzas, factores y condiciones físicas básicas que la gobiernan sin dejar ninguna incógnita o cabo suelto. ¿Existe siquiera una teoría así?

DOS TEORÍAS RIVALES

La explicación más popular de la sustentación es sin duda la basada en el principio de Bernoulli, postulado por el matemático

EN SÍNTESIS

Desde un punto de vista matemático, los ingenieros saben diseñar aviones que vuelen. Pero las ecuaciones no explican por qué se produce la sustentación aerodinámica.

Dos teorías alternativas dan cuenta de las fuerzas y factores implicados en la sustentación, pero ambas explicaciones son incompletas.

Aunque los expertos en aerodinámica tratan de subsanar las lagunas en nuestra comprensión de este fenómeno, de momento no existe consenso.

Clásicos imperfectos

Se han propuesto dos teorías para explicar por qué los aviones se mantienen en el aire. Una es el teorema de Bernoulli, que asocia la sustentación a una zona de mayor velocidad y menor presión sobre el ala. La otra es el principio newtoniano de acción y reacción, que describe la sustentación como una fuerza vertical sobre el ala, ejercida por el aire que se mueve bajo ella. Aunque las dos teorías son correctas y no se contradicen entre sí, los partidarios de cada una de ellas defienden sus puntos de vista con un entusiasmo que raya en la obsesión. No obstante, ninguna proporciona una explicación completa de la sustentación (tampoco la combinación de ambas), ya que a cada una le falta algo. Tal explicación debería dar cuenta de todas las fuerzas y factores que actúan sobre el ala, sin dejar ningún cabo suelto.

EL TEOREMA DE BERNOULLI

Este teorema trata de explicar la sustentación a partir de la curvatura de la superficie superior del «perfil aerodinámico» (el nombre técnico del ala). La idea es que, debido a dicha curvatura, el aire que viaja sobre el ala se mueve más rápido que el que recorre la cara inferior, la cual es plana. El teorema de Bernoulli afirma que esa mayor velocidad produce una zona de baja presión encima del ala, y eso genera la sustentación.

El aire va más rápido sobre el ala

Sustentación

El aire va más lento bajo el ala

PERO...

Aunque el teorema de Bernoulli es correcto, hay varios motivos por los que no constituye una explicación completa de la sustentación. Es un hecho experimental que el aire se mueve más deprisa a lo largo de una superficie curvada, pero el teorema no explica por qué ocurre esto o por qué la mayor velocidad del aire sobre el ala trae aparejada una menor presión. Además, en la práctica, un avión cuyas alas tengan la superficie superior curvada (o incluso ambas superficies planas) es capaz de volar invertido siempre que el perfil aerodinámico presente un ángulo de ataque apropiado con respecto al aire.

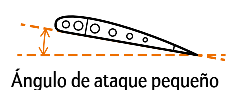
No explica por qué los aviones pueden volar invertidos o tener alas planas.

No explica por qué las porciones de aire (*rojo*) que recorren la parte superior del ala se mueven más rápido (y alcanzan antes el borde de fuga) que las que viajan por debajo.

No acaba de explicar la zona de baja presión sobre el ala.

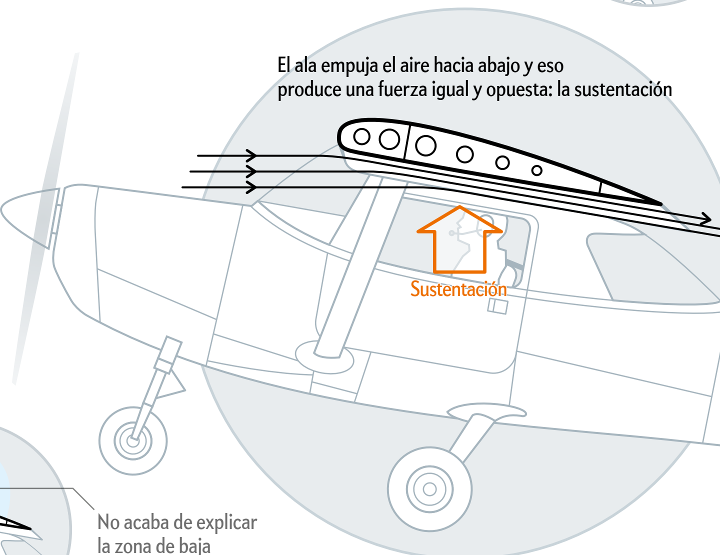
LA TERCERA LEY DE NEWTON

De acuerdo con la tercera ley de Newton, cuando el ala desvía el aire incidente hacia abajo se genera una fuerza igual hacia arriba. Esta explicación newtoniana de la sustentación sirve para alas de cualquier forma, ya sean curvadas o planas, simétricas o no. También es válida cuando la aeronave vuela invertida, siempre que el ángulo de ataque sea el adecuado. Por todo ello, constituye una explicación más completa y universal que la basada en el teorema de Bernoulli.



Ángulo de ataque pequeño

Ángulo de ataque grande



PERO...

Por sí solo, el principio de acción y reacción sigue sin explicar la zona de baja presión sobre el ala, que existe independientemente de si el perfil aerodinámico es curvo o no.

No acaba de explicar la zona de baja presión sobre el ala.

ILUSTRACIONES DE L-DOPA

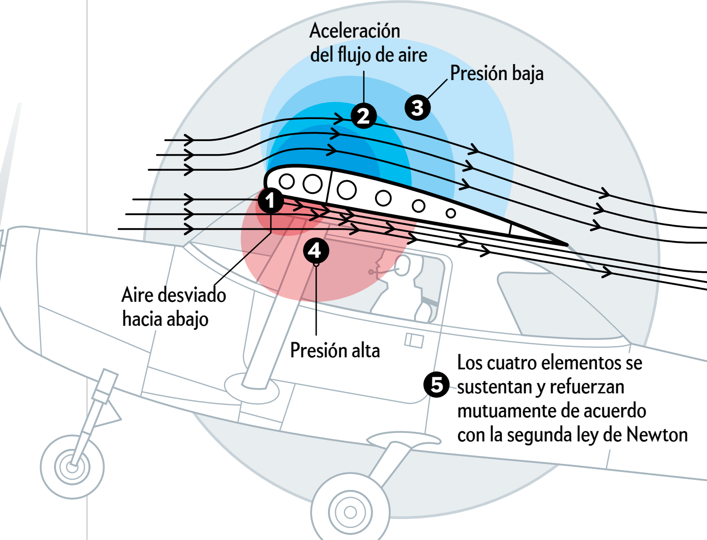
APORTACIONES RECIENTES

Nuevas ideas sobre sustentación

Hoy en día, el diseño de las aeronaves se basa en simulaciones de dinámica de fluidos computacional, así como en ecuaciones que reflejan completamente la viscosidad de los fluidos reales. Aunque aún no disponemos de una explicación física satisfactoria para la sustentación, algunos intentos recientes podrían habernos acercado a ese objetivo.

CUATRO ELEMENTOS INTERDEPENDIENTES

El experto en aerodinámica Doug McLean explica la sustentación a partir de cuatro componentes cruciales (*mostrados en la figura*) que se sustentan mutuamente a través de una relación causa-efecto recíproca. Esa interrelación, que constituye el novedoso quinto elemento de la explicación de McLean, se basa en la segunda ley de Newton: la fuerza es igual al producto de la masa por la aceleración. Cada porción de fluido afecta a las demás, y eso genera los cuatro elementos que permiten el vuelo.

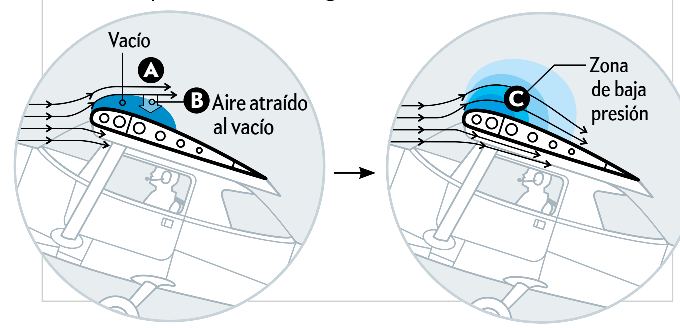


PERO...

Aunque McLean afirma que la menor presión sobre el ala y la mayor presión bajo ella se deben a que el perfil aerodinámico está «totalmente rodeado de aire que fluye», eso no explica cómo surge inicialmente la zona de baja presión.

EL ORIGEN DE LA BAJA PRESIÓN SOBRE EL ALA

Mark Drela, experto en dinámica de fluidos, ha intentado abordar el problema que se les resistió a Newton y Bernoulli: el origen de la zona de baja presión (o vacío parcial) sobre el ala. Al principio el aire fluye en línea recta sobre el perfil aerodinámico (A), formando un vacío. Este vacío arrastra el aire hacia abajo (B), llenando esa zona y eliminando gran parte del vacío, pero no todo. El vacío parcial que persiste basta para obligar al aire a seguir el perfil curvado del ala (C).



suizo Daniel Bernoulli en su tratado *Hydrodynamica*, publicado en 1738. Bernoulli perteneció a una familia de matemáticos: su padre, Johann, realizó contribuciones al cálculo infinitesimal y su tío Jakob acuñó el término «integral». Muchos de los trabajos de Daniel Bernoulli estuvieron relacionados con el flujo de los fluidos. El aire es un fluido, y el teorema que lleva su nombre generalmente se enuncia en el contexto de la dinámica de fluidos. En términos simples, el principio de Bernoulli afirma que la presión de un fluido disminuye a medida que aumenta su velocidad, y viceversa.

El teorema de Bernoulli intenta explicar la sustentación como una consecuencia de la curvatura de la superficie superior del «perfil aerodinámico», que es el término técnico para referirnos al ala de un avión. La idea es que, debido a dicha curvatura, el aire que pasa por encima del ala se mueve más rápido que el que circula a lo largo de la superficie inferior, que es plana. Y, de acuerdo con el teorema de Bernoulli, el aumento de la velocidad del aire sobre el ala produce una disminución de presión en esa zona, lo que da lugar a la sustentación.

Infinidad de datos empíricos, obtenidos a partir del estudio de las líneas de corriente (visualizadas mediante partículas de humo) en túneles de viento, así como en experimentos de laboratorio con toberas y tubos de Venturi, certifican que el teorema de Bernoulli es correcto. Aun así, existen varias razones por las que este principio no constituye una explicación completa de la sustentación. Aunque es un hecho comprobado que el aire se mueve más deprisa a lo largo de una superficie curvada, el principio de Bernoulli no aclara por qué ocurre esto. En otras palabras, el teorema no dice cómo llega a establecerse una mayor velocidad del aire en la parte superior del ala.

Hay multitud de razonamientos incorrectos para justificar este incremento de velocidad. El más habitual es la teoría del «mismo tiempo de tránsito», que afirma que las porciones de aire que se separan en el borde de ataque (la parte delantera del ala) deben volver a reunirse en el borde de fuga (la parte posterior). Dado que el aire que viaja sobre el ala tiene que recorrer, en el mismo tiempo, más distancia que el que se desplaza bajo ella, debe ir más rápido. La falacia de este argumento radica en que no hay ningún motivo por el que las dos porciones de aire tengan que alcanzar el borde de fuga simultáneamente. Y de hecho no lo hacen: los datos empíricos muestran que el aire de la parte superior se mueve mucho más deprisa de lo que indicaría la teoría del mismo tiempo de tránsito.

Existe también una famosa «demostración» del principio de Bernoulli, que se repite en muchas explicaciones divulgativas y vídeos de YouTube, e incluso en algunos libros de texto. Consiste en sostener horizontalmente una hoja de papel a la altura de la boca (dejando que el borde más alejado de nosotros caiga libremente) y soplar a lo largo de su superficie superior curvada. La hoja se eleva, lo que supuestamente ilustra el efecto Bernoulli. Pero entonces, si soplásemos a lo largo de la cara inferior del papel, deberíamos observar el fenómeno opuesto: la velocidad del aire que se mueve bajo la hoja debería empujarla hacia abajo. Sin embargo, vuelve a elevarse.

El hecho de que el papel curvado ascienda al aplicar un flujo de aire en uno de sus lados «no se produce porque el aire se mueva a una velocidad distinta en cada cara», puntualiza Holger Babinsky, profesor de aerodinámica de la Universidad de Cambridge, en su artículo «How do wings work?» (¿Cómo funcionan las alas?). Para demostrarlo, podemos soplar a lo largo de una hoja de papel recta (por ejemplo, una que cuelgue verticalmente); veremos que el papel no se mueve hacia ningún

lado porque «la presión en ambas caras es la misma, a pesar de la evidente diferencia de velocidades».

La segunda limitación del teorema de Bernoulli es que no dice cómo ni por qué la mayor velocidad sobre el ala trae aparejada una presión más baja, en vez de una más alta. Sería natural pensar que el aire se comprime cuando la curvatura del ala lo desplaza hacia arriba, lo que produciría un aumento de presión sobre el ala. Además, en nuestro día a día, este tipo de cuellos de botella suelen frenar las cosas en lugar de acelerarlas. Por ejemplo, cuando dos o más carriles de una autopista quedan reducidos a uno solo, los coches que circulan por ellos no van más rápido: lo que se produce es una ralentización del tráfico y hasta puede que un atasco. Las moléculas de aire que viajan sobre el ala no se comportan de esta manera, pero el teorema de Bernoulli no nos dice por qué no.

El tercer problema aporta el argumento más concluyente contra el teorema de Bernoulli como una explicación completa de la sustentación: un avión con la parte superior de sus alas curvada es capaz de volar invertido. Durante el vuelo invertido, la superficie curvada pasa a ser la inferior, lo cual, de acuerdo con el teorema de Bernoulli, generaría una región de menor presión bajo el ala. Este efecto, unido al de la gravedad, debería empujar el avión hacia abajo en lugar de mantenerlo en el aire. Más aún, las aeronaves con alas simétricas (es decir, con la misma curvatura en ambas superficies, o incluso con las dos planas) también pueden realizar vuelos invertidos siempre que el perfil aerodinámico se enfrente al viento con el ángulo de ataque adecuado. El teorema de Bernoulli por sí solo no basta para explicar estos hechos.

La otra teoría de la sustentación está basada en la tercera ley del movimiento de Newton, el principio de acción y reacción. Esta teoría afirma que el ala mantiene al avión en vuelo al empujar el aire hacia abajo. El aire tiene masa y, por la tercera ley de Newton, al ser empujado genera sobre el ala una fuerza igual y de sentido contrario, la sustentación. La explicación newtoniana sirve para alas de cualquier forma, ya sean curvadas o planas, simétricas o no. Y funciona con aviones que vuelan derechos o invertidos. Además, las fuerzas que intervienen las experimentamos en nuestra vida cotidiana. Por ejemplo, cuando sacamos la mano por la ventanilla de un coche en movimiento y la inclinamos hacia arriba, el aire se desvía hacia abajo y la mano se eleva. Por todas estas razones, la tercera ley de Newton constituye una explicación de la sustentación más universal y completa que el teorema de Bernoulli.

Pero, por sí mismo, el principio de acción y reacción tampoco explica la menor presión en la parte superior del ala, que existe independientemente de que el perfil aerodinámico sea curvado. La zona de baja presión sobre el ala solo desaparece cuando el avión aterriza y se detiene, momento en que ambas caras del ala pasan a estar de nuevo a la presión ambiente. Pero, mientras el avión está en vuelo, esa región de baja presión es un elemento imprescindible de la sustentación aerodinámica, y debemos explicarla.

UN PROBLEMA CON HISTORIA

Por supuesto, ni Bernoulli ni Newton trataban de explicar por qué puede volar una aeronave, dado que vivieron mucho antes del desarrollo del vuelo mecánico. Sus respectivas leyes y teorías se readaptaron después de que los hermanos Wright llevaran a cabo su vuelo, un hito que hizo que entender la sustentación aerodinámica se convirtiera en un asunto serio y apremiante para los científicos.

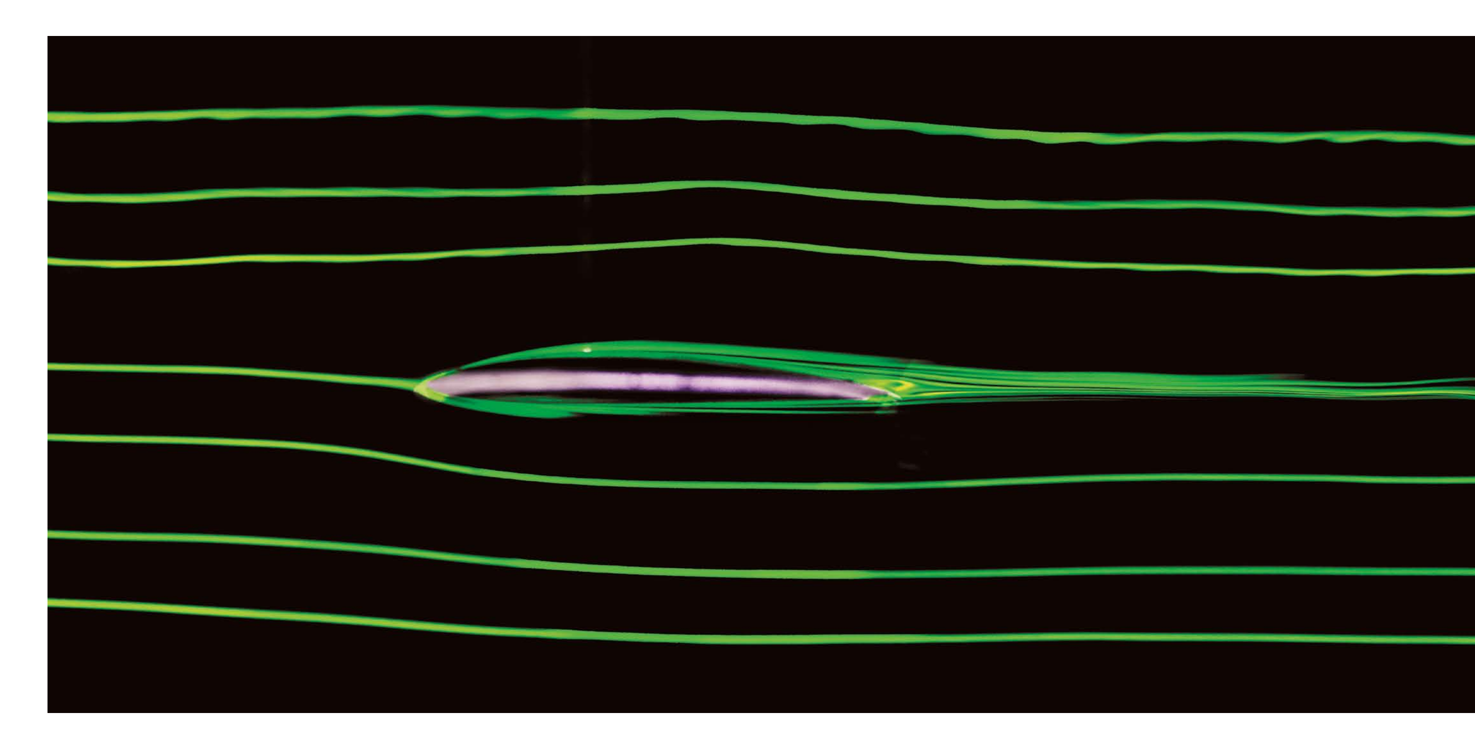
La mayoría de las explicaciones teóricas se formularon en Europa. En los primeros años del siglo XX, varios científicos británicos propusieron argumentos matemáticos para justificar la sustentación, los cuales trataban el aire como un fluido perfecto, es decir incompresible y sin viscosidad. Estas hipótesis eran poco realistas, pero tal vez razonables teniendo en cuenta que los investigadores se enfrentaban por primera vez al nuevo fenómeno del vuelo controlado y propulsado. Dichas suposiciones hicieron las matemáticas subyacentes más sencillas y directas, pero hubo que pagar un precio: por satisfactorias que fueran a nivel matemático, las descripciones de perfiles aerodinámicos moviéndose en el seno de gases ideales resultaban insuficientes desde un punto de vista empírico.

En Alemania, uno de los científicos que estudió el problema de la sustentación fue el mismísimo Albert Einstein. En 1916 publicó un breve artículo titulado «Teoría elemental de las ondas de agua y del vuelo» en la revista *Die Naturwissenschaften*, con el que pretendía explicar la capacidad de sustentación de las alas de máquinas voladoras y aves planeadoras. «Hay mucha oscuridad alrededor de estas cuestiones», escribió Einstein. «He de confesar que nunca he encontrado una respuesta sencilla, ni siquiera en la literatura especializada.»

Es como si estos cuatro componentes surgiesen de manera colectiva y se sustentaran entre sí mediante actos de creación y causación mutua

A continuación, Einstein exponía un razonamiento basado en un fluido incompresible y sin fricción, es decir, un fluido ideal. Sin mencionar explícitamente al matemático suizo, ofreció una descripción compatible con el principio de Bernoulli, al afirmar que la presión del fluido era mayor allí donde su velocidad era menor, y viceversa. Para aprovechar estas diferencias de presión, Einstein propuso un perfil aerodinámico con una protuberancia en su parte superior, asumiendo que esta forma incrementaría la velocidad del aire (y, por lo tanto, reduciría la presión) sobre el abultamiento.

Einstein probablemente pensó que su análisis a partir de un fluido ideal sería igualmente válido para los fluidos del mundo real. En 1917, basándose en su teoría, diseñó un perfil aerodinámico que pasaría a ser conocido popularmente como «ala de lomo de gato», por su parecido con el espinazo encorvado de un gato que se estira. Envió su diseño a la compañía aeronáutica berlinesa LVG, que lo usó para construir una nueva máquina voladora. Un piloto de pruebas manifestó que el avión se movía en el aire como «una pata preñada». Mucho más tarde, en 1954, el propio Einstein calificó su incursión en la aeronáutica como «una locura de juventud». La misma persona que desarrolló teorías radicalmente nuevas que arrojaron luz sobre los dominios más pequeños y más grandes del universo no fue, sin embargo, capaz de contribuir a la comprensión de la sustentación ni de concebir un perfil aerodinámico funcional.



UN EXPERIMENTO en un túnel de agua del Laboratorio de Mecánica de Fluidos del Centro de Investigación Ames de la NASA emplea un tinte fluorescente para visualizar el flujo alrededor del ala de un avión. Las líneas de corriente, que se mueven de izquierda a derecha y se curvan al encontrarse con el perfil aerodinámico, ilustran la física de la sustentación.

HACIA UNA TEORÍA COMPLETA

Los planteamientos científicos contemporáneos en lo que se refiere al diseño de aeronaves recurren a simulaciones de dinámica de fluidos computacional (DFC) y a las llamadas ecuaciones de Navier-Stokes, que incluyen los efectos de la viscosidad del aire real. Las soluciones a estas ecuaciones y el resultado de las simulaciones de DFC proporcionan predicciones de las distribuciones de presión, patrones del flujo de aire y datos cuantitativos que actualmente son la base del diseño de las aeronaves más avanzadas. Aun así, siguen sin ofrecer una explicación física y cualitativa de la sustentación.

En los últimos años, el experto en aerodinámica Doug McLean ha intentado ir más allá del mero formalismo matemático y al abordar las relaciones físicas de causa y efecto que explican la sustentación en cualquier situación de la vida real. McLean, que desarrolló la mayor parte de su carrera profesional como ingeniero en la división de aviones comerciales de Boeing (donde se especializó en el desarrollo de programas de DFC), publicó sus nuevas ideas en 2012 en el libro *Understanding aerodynamics: Arguing from the real physics* («Entender la aerodinámica: Una discusión desde la física real»).

Teniendo en cuenta que el libro tiene más de 500 páginas de denso análisis técnico, constituye una grata sorpresa encontrar un apartado titulado «Una explicación de la sustentación de un perfil aerodinámico, accesible para una audiencia no técnica». Redactar esas 16 páginas no le resultó nada fácil a McLean, un experto en el tema. «Probablemente fue la parte del libro que más me costó escribir», admite. «La revisé incontables veces y nunca estaba totalmente satisfecho con el resultado.»

La complicada explicación de la sustentación que presenta McLean comienza con la hipótesis básica habitual en cualquier teoría aerodinámica: el aire alrededor del ala se comporta como un «medio continuo que se deforma para seguir el contorno del perfil aerodinámico». Esta deformación se traduce en la existencia de gruesas capas de aire sobre y bajo el ala. «El perfil influye en la presión a lo largo de una región extensa, dando lugar a lo que se conoce como un campo de presiones», escribe McLean. «Al producirse la sustentación, se forma siempre una nube difusa de baja presión sobre el ala, y normalmente otra de alta presión por debajo de ella. Cuando ambas nubes tocan la superficie, dan lugar a la diferencia de presión que ejerce la sustentación sobre el perfil aerodinámico.»

El ala empuja el aire hacia abajo, de modo que el flujo de aire se desvía en esa dirección. El aire sobre el ala se acelera de acuerdo con el principio de Bernoulli. Además, la presión aumenta debajo del ala y disminuye encima de ella. Eso significa que la explicación de la sustentación de McLean incluye cuatro ingredientes necesarios: una desviación hacia abajo del flujo de aire, un aumento de la velocidad del flujo, una zona de baja presión y una zona de alta presión.

Pero el aspecto más novedoso y distintivo de la explicación de McLean es la interconexión de estos cuatro elementos, que, según él, «se sustentan mutuamente a través de una relación causa-efecto recíproca, de modo que ninguno existiría sin los demás. La diferencia de presión ejerce la fuerza de sustentación sobre el perfil aerodinámico, mientras que la desviación del flujo hacia abajo y los cambios en su velocidad mantienen esa diferencia de presión». Esta interrelación constituye el quinto elemento de la explicación de McLean: la reciprocidad entre los otros cuatro. Es como si estos cuatro componentes surgiesen de manera colectiva y se sustentaran entre sí mediante actos de creación y causación mutua.

Parece haber una pizca de magia en esta sinergia. El proceso que describe McLean nos hace pensar en cuatro individuos que se mantuvieran en el aire tirándose mutuamente de las lengüetas de sus botas. Como reconoce él mismo, se trata de una «cade-

na circular de causas y efectos». ¿Cómo es posible que cada elemento sustente y refuerce a todos los demás? ¿Y qué causa esta interacción dinámica y mutua? McLean tiene muy clara la respuesta: la segunda ley de Newton.

Esa ley afirma que la aceleración de un cuerpo, o de una porción de fluido, es proporcional a la fuerza que se ejerce sobre él. Según explica McLean, «la segunda ley de Newton nos dice que, cuando una diferencia de presión da lugar a una fuerza sobre una porción del fluido, debe producir un cambio en la magnitud o la dirección de su velocidad (o en ambas)». Pero, de manera recíproca, la diferencia de presión existe gracias a la aceleración de las porciones del fluido.

¿No estamos intentando sacar algo de donde no hay nada? McLean sostiene que no: si el ala estuviera en reposo, no existiría ninguno de estos fenómenos que se refuerzan entre sí. Pero el hecho de que el ala se mueva a través del aire, con cada porción de fluido afectando a todas las demás, hace que emerjan todos estos elementos codependientes y los mantiene durante el vuelo.

NO HAY UNA RESPUESTA SIMPLE

Poco después de la publicación de *Understanding aerodynamics*, McLean se dio cuenta de que no había explicado completamente todos los elementos de la sustentación aerodinámica, puesto que no había aclarado de manera convincente por qué cambian las presiones en torno al ala y dejan de coincidir con la presión ambiente. Así que, en noviembre de 2018, publicó en la revista *The Physics Teacher* un artículo dividido en dos partes donde proponía «una explicación física completa» de la sustentación aerodinámica.

Aunque el artículo reproduce en gran medida los razonamientos previos de McLean, también intenta explicar mejor la causa de que el campo de presiones no sea uniforme y adquiera la forma que observamos. En concreto, su nuevo argumento introduce una interacción mutua al nivel del campo de flujo, de manera que el campo de presiones no uniforme es el resultado de una fuerza aplicada, la que ejerce el perfil aerodinámico sobre el aire al empujarlo hacia abajo.

La cuestión de si el apartado menos técnico del libro de McLean y su posterior artículo consiguen proporcionar una descripción completa y correcta de la sustentación está abierta a interpretación y debate. Hay razones por las que es no es fácil dar una explicación clara, simple y satisfactoria de la sustentación aerodinámica. Una de ellas es que el flujo de un fluido es más complejo y difícil de entender que el movimiento de los objetos sólidos, más aún cuando el flujo se separa en el borde de ataque del ala y experimenta fuerzas físicas distintas a lo largo de las superficies superior e inferior de la misma. Además, algunas de las controversias relacionadas con la sustentación no afectan tanto a los hechos como a la forma de interpretarlos, y ahí pueden entrar matices imposibles de zanjar experimentalmente.

No obstante, llegados a este punto, solo resta explicar unos pocos aspectos importantes. Recordemos que la sustentación es el resultado de la diferencia de presión entre las partes superior e inferior del perfil aerodinámico. Ya tenemos una explicación aceptable de lo que ocurre en la superficie inferior: el aire incidente empuja el ala tanto verticalmente (produciendo sustentación) como horizontalmente (generando resistencia). El empuje vertical adquiere la forma de una zona de alta presión bajo el ala, causada por un sencillo mecanismo newtoniano de acción y reacción.

Sobre el ala, sin embargo, la situación es muy diferente. Allí se sitúa una región de baja presión que también forma parte de la fuerza de sustentación aerodinámica. Pero, si no la explican ni el principio de Bernoulli ni la tercera ley de Newton, ¿a qué responde? Las líneas de corriente muestran que el aire sobre el ala se ajusta estrechamente a la curvatura descendente del perfil. Pero ¿por qué deben las porciones de aire que recorren la superficie superior del ala seguir su curvatura descendente? ¿Por qué no pueden separarse de ella y volar hacia atrás en línea recta?

Mark Drela, profesor de dinámica de fluidos en el Instituto de Tecnología de Massachusetts y autor del libro *Flight vehicle aerodynamics* («Aerodinámica de los vehículos de vuelo»), ofrece una respuesta: «Si las porciones de aire se separasen de la tangente a la superficie superior del perfil aerodinámico, se produciría literalmente un vacío bajo ellas», señala. «Entonces el vacío succionaría las porciones de aire hasta que estas lo llenasen casi por completo, es decir, hasta que el flujo volviese a moverse siguiendo la tangente al perfil. Este es el mecanismo físico que obliga a las porciones de aire a seguir la forma del ala: persiste un ligero vacío parcial que las mantiene en una trayectoria curva.»

Esta separación de las porciones de aire respecto a las que tienen justo encima es lo que crea el área de baja presión sobre el ala. Pero hay otro efecto que acompaña a este proceso: el aumento de la velocidad del aire sobre el perfil aerodinámico. Drela apunta que «la presión reducida sobre el ala sustentada también "tira horizontalmente" de las porciones de aire a medida que se aproximan a ella, de modo que llegan a la superficie superior del perfil con mayor velocidad». Y asegura que «el incremento de la velocidad sobre el ala puede considerarse un efecto colateral de la disminución de la presión en esa zona».

Pero, cuando se trata de explicar la sustentación a un nivel no técnico, siempre hay otro experto con una respuesta distinta. «Odio discrepar de mi estimado colega Mark Drela», replica Babinsky, «pero si la formación de un vacío fuera la explicación, resultaría difícil entender por qué hay ocasiones en las que el flujo, pese a todo, sí se separa de la superficie. Pero, en todo lo demás, está en lo cierto. El problema es que no existe una explicación rápida y sencilla».

El propio Drela admite que su descripción no es satisfactoria en algunos sentidos. «Un problema evidente es que no hay ninguna explicación que vaya a ser aceptada de forma universal», concluye. Así que, ¿dónde nos deja eso? En realidad, justo donde empezamos: con la afirmación de John D. Anderson de que «no hay una respuesta simple y concisa a esta cuestión». IyC

PARA SABER MÁS

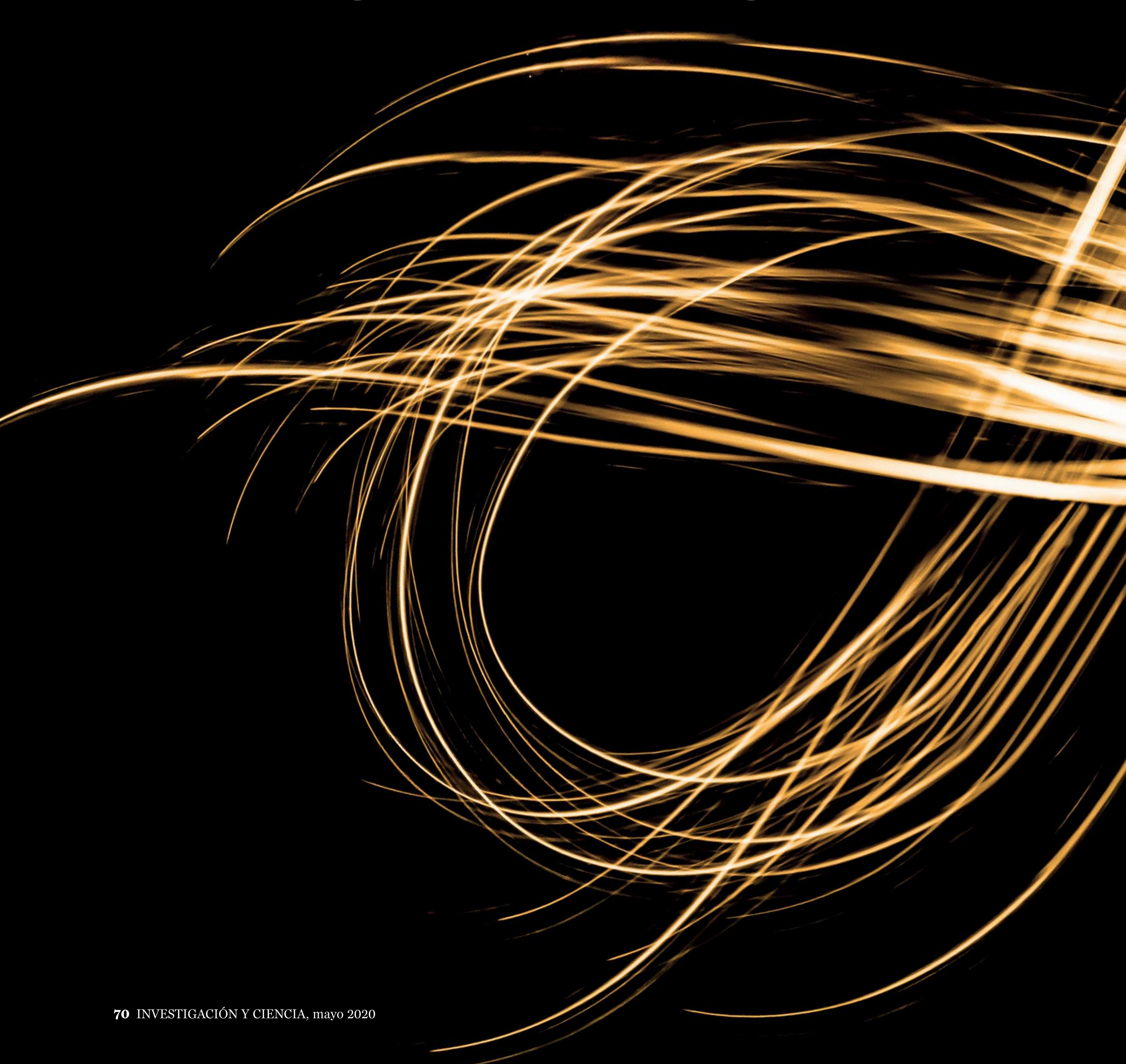
How do wings work? Holger Babinsky en *Physics Education*, vol. 38, n.º 6, págs. 497-503, noviembre de 2003.
The enigma of the aerofoil: Rival theories in aerodynamics, 1909-1930. David Bloor. University of Chicago Press, 2011.
Understanding aerodynamics: Arguing from the real physics. Doug McLean. Wiley, 2012.
You will never understand lift. Peter Garrison en *Flying*, 4 de junio de 2012.
Flight vehicle aerodynamics. Mark Drela. MIT Press, 2014.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los orígenes del primer avión motopropulsado con piloto a bordo. Fred E. C. Culick en *IyC*, septiembre de 1979.
El vuelo de los insectos. Michael Dickinson en *IyC*, agosto de 2001.
Despegues en caliente. Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik en *IyC*, julio de 2018.

MATEMÁTICAS

DEMOSTRAR LA HIPÓTESIS DEL CONTINUO



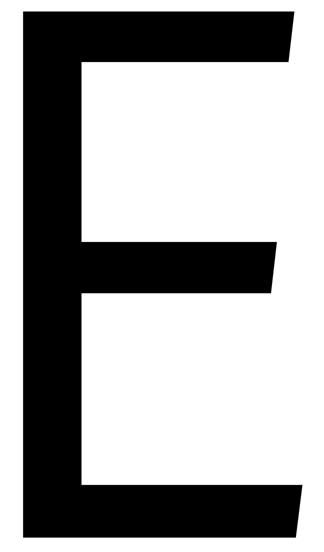


Se ha abierto una posible vía para resolver una cuestión que matemáticos y lógicos creían indecidible: si existe o no un infinito más grande que el de los números naturales y más pequeño que el de los números reales

Jean-Paul Delahaye

Jean-Paul Delahaye es profesor emérito de la Universidad de Lille y miembro del Centro de Investigación en Informática, Señal y Automática de Lille.





L CONCEPTO DE INFINITO SIEMPRE HA SIDO FUENTE DE GRANDES DIficultades. Filósofos y teólogos han sostenido discusiones interminables (y bastante estériles) en torno a él, y los propios matemáticos no comenzaron a manejarlo de manera precisa y satisfactoria hasta el siglo XIX. En concreto, eran conscientes de que existían distintos tipos de infinito, pero no sabían cómo caracterizarlos o compararlos.

Se enfrentaban a lo que parecían absurdos. Por ejemplo, al multiplicar por 2 cada número natural, establecemos una correspondencia biunívoca (uno a uno), o biyección, entre los números naturales y los números naturales pares: $1 \leftrightarrow 2$, $2 \leftrightarrow 4$, $3 \leftrightarrow 6$, $4 \leftrightarrow 8$, $5 \leftrightarrow 10$, etc. De esta manera, a todo número natural n le corresponde un único natural par $p = 2n$; y a la inversa, a cualquier número natural par p le corresponde un único natural (par o impar) $n = p/2$. Esta correspondencia biunívoca sugiere que hay tantos números naturales pares como naturales pares e impares juntos, a pesar de que los últimos parezcan el doble de numerosos.

En la década de 1870, el matemático alemán Georg Cantor propuso emplear este concepto de la correspondencia uno a uno para comparar conjuntos formados por una infinidad de elementos. Este procedimiento no conduce a ninguna contradicción y permite definir un conjunto infinito como un conjunto que puede ponerse en biyección con un subconjunto (en sentido estricto) de sí mismo, una definición que podemos verificar fácilmente en nuestro ejemplo de los números naturales y los naturales pares.

A partir de ahí, Cantor construyó una teoría de conjuntos que constituye una teoría matemática sobre el infinito y que es la base sobre la que se desarrollan todas las matemáticas contemporáneas. La axiomatización de la teoría de conjuntos planteó algunas dificultades, pero en lo esencial acabaron siendo resueltas: desde principios del siglo XX, disponemos de un sistema de axiomas que hasta ahora no ha generado contradicciones en el trabajo de los matemáticos.

Pero podríamos decir que esta teoría axiomática de los conjuntos es un tanto endeble, porque deja sin respuesta cuestiones elementales como la llamada hipótesis del continuo, que explicaremos más adelante. El principal objetivo de quienes investigan hoy en este campo es perfeccionar la teoría para que responda mejor a estas cuestiones.

RESPONDER PREGUNTAS SIN RESPUESTA

Durante el último decenio se han obtenido resultados muy interesantes en esta dirección, y uno de los principales artífices es Hugh Woodin, matemático de la Universidad Harvard. Woodin está convencido de que es posible solucionar el misterio de la hipótesis del continuo, es decir, que esta suposición puede ser verdadera o falsa, pero no «indecidible». Y esta idea lo llevó a proponer y desarrollar dos programas de investigación opuestos.

El primero de ellos pretendía establecer que la hipótesis del continuo es falsa, como creía Woodin hace quince años. Pero luego cambió de opinión e inició un segundo programa de investigación, articulado alrededor del concepto que denomina «*L* último» y que, según él, conducirá a una solución satisfactoria y definitiva de los principales enigmas que plantea el infinito. En particular, a la demostración de que la hipótesis del continuo es cierta.

Tratemos de explicar, en líneas generales, esta vía hacia el *L* último. Para comprender bien el problema, necesitamos retroceder un poco en el tiempo.

La verdad más simple sobre el infinito matemático, descubierta y publicada por Cantor en 1891, es que puede ser de varios tipos [*véase* «El infinito», por Agustín Rayo. INVESTIGACIÓN Y CIENCIA,

EN SÍNTESIS

La teoría de conjuntos, base de las matemáticas, descansa sobre un sistema de axiomas denominado ZFC. Constituye una teoría de los infinitos, entre los que existe toda una jerarquía.

Según la hipótesis del continuo, no existe un infinito intermedio entre el de los números naturales y el de los números reales. En la teoría ZFC, esta suposición es indemostrable.

Los matemáticos buscan completar la teoría ZFC con axiomas razonables que permitan acabar con la indecidibilidad de la hipótesis del continuo, y recientemente han hallado una vía prometedora.

PÁGINAS ANTERIORES: GETTY IMAGES/NNOROZOFF/ISTOCK

Distintos tipos de infinito

Para comparar el tamaño de dos conjuntos E_1 y E_2 con infinitos elementos, intentamos averiguar si existe una biyección (una correspondencia uno a uno) entre los elementos de E_1 y los de E_2. Si es así, decimos que E_1 y E_2 son equipotentes, o que tienen el mismo cardinal.

Un conjunto infinito equipotente al conjunto $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, 3, ...\}$ de los números naturales se denomina «numerable». Por ejemplo, es fácil constatar que el conjunto de los números naturales pares (*a*), el de los naturales múltiplos de 5 (*b*) y el de los enteros $\mathbb{Z}$ (*c*) son numerables. Tampoco es difícil demostrar que el conjunto $\mathbb{Q}$ de los números racionales (los que se pueden escribir de la forma *p*/*q*, donde *p* y *q* son números enteros, como 1/2 o 7/3) es numerable. Y también lo son el conjunto de las parejas (*p*, *q*) de enteros, el de los tríos (*u*, *v*, *w*) de números racionales, etc.

Por contra, el conjunto de los números reales comprendidos entre 0 y 1 (por ejemplo) no es numerable. Para demostrarlo, supongamos que ese conjunto [0, 1] fuese numerable. Entonces podríamos enumerar sus elementos uno a uno, lo que daría una lista infinita, pero numerable, de números del tipo

$$0,d_{1,1}d_{1,2}d_{1,3}d_{1,4}d_{1,5}d_{1,6}...$$
$$0,d_{2,1}d_{2,2}d_{2,3}d_{2,4}d_{2,5}d_{2,6}...$$
$$0,d_{3,1}d_{3,2}d_{3,3}d_{3,4}d_{3,5}d_{3,6}...$$
$$0,d_{4,1}d_{4,2}d_{4,3}d_{4,4}d_{4,5}d_{4,6}...$$
$$...$$

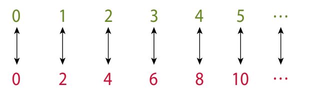
donde $d_{i,1}$, $d_{i,2}$, $d_{i,3}$, etc. son las cifras del desarrollo decimal del *i*-ésimo número de la lista (excluimos los desarrollos decimales que terminan con una cantidad infinita de nueves). Formemos ahora un número $x = 0,d_1d_2d_3d_4...$ tal que $d_1 \neq d_{1,1}$, $d_2 \neq d_{2,2}$, $d_3 \neq d_{3,3}$, etc. (evitando elegir el 9 para las cifras d_i). Pero *x* no figura en la lista anterior (porque, para cualquier *n*, su *n*-ésima cifra decimal difiere de la *n*-ésima cifra decimal del *n*-ésimo número de la lista), pese a que es un número real comprendido entre 0 y 1.

Esta contradicción demuestra que la hipótesis de partida, es decir, que el conjunto [0, 1] es numerable y por tanto sus elementos se pueden enumerar en una lista, es falsa.

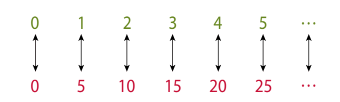
Así que los números reales comprendidos entre 0 y 1 no son numerables. Su infinito es de un orden superior al de $\mathbb{N}$ y nos referimos a él como el «infinito del continuo», porque los números reales se pueden representar como los puntos de una línea continua. Esta representación geométrica de los números también permite ver fácilmente que el intervalo [0, 1] es equipotente, por ejemplo, al intervalo [0, 5]: dos intervalos de longitudes diferentes tienen la misma infinidad de puntos (*d*).

Es posible demostrar cosas aún más asombrosas, como que la superficie de un cuadrado o el volumen de un cubo contienen la misma infinidad de puntos que un segmento de una recta.

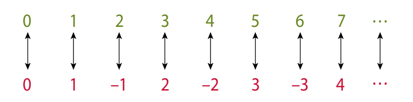
(a) El conjunto de los números pares es numerable



(b) El conjunto de los múltiplos de 5 es numerable



(c) El conjunto de los números enteros es numerable



(d) El conjunto de los puntos de un segmento de longitud 1 es equipotente al conjunto de los puntos de un segmento de longitud 5

diciembre de 2008]. A grandes rasgos, el teorema de Cantor afirma que cada vez que consideramos un conjunto infinito *E*, el conjunto de sus partes (o subconjuntos), denotado por $\mathcal{P}(E)$, es de un tamaño infinito estrictamente mayor al de *E*. Eso significa que no es posible poner $\mathcal{P}(E)$ en biyección con *E*.

Así, el conjunto de los números naturales $\mathbb{N} = \{0, 1, 2, ..., n, ...\}$ es estrictamente más pequeño que el conjunto $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ de sus partes, que contiene, por ejemplo, al propio $\mathbb{N}$, al subconjunto de los números pares, al de los números primos, al de las potencias de 2, etc. Hay demasiados elementos en $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ para ponerlos en biyección con los de $\mathbb{N}$.

Y repitiendo la operación, es decir, considerando la secuencia $\mathbb{N}$, $\mathcal{P}(\mathbb{N})$, $\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{N}))$, $\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{N})))$..., disponemos de una infinidad de conjuntos infinitos distintos y cada vez más grandes, gracias al teorema de Cantor.

LA HIPÓTESIS DEL CONTINUO

El infinito de los números naturales, $\mathbb{N}$, es el más sencillo y pequeño que existe. Lo llamamos «infinito numerable» y decimos que cualquier conjunto infinito que se pueda poner en biyección con $\mathbb{N}$ es numerable. Como hemos visto, $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ es un infinito de orden superior. Este infinito es el mismo que el del conjunto $\mathbb{R}$ de los números reales, ya que podemos demostrar fácilmente que existe una biyección entre $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ y $\mathbb{R}$.

Sabiendo que $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ o $\mathbb{R}$ son conjuntos estrictamente más grandes que $\mathbb{N}$, surge la siguiente pregunta: ¿hay infinitos intermedios entre el de $\mathbb{N}$ y el de $\mathbb{R}$? Los matemáticos nunca los han encontrado, y eso los ha llevado a suponer que no existen: esta es la hipótesis del continuo, originalmente planteada por Cantor. La palabra «continuo» evoca la infinidad de los números reales, que se pueden representar como los puntos de una línea continua.

En otras palabras, la hipótesis del continuo afirma que todo subconjunto infinito de $\mathbb{R}$ estará en biyección con $\mathbb{N}$ (si se trata de un subconjunto infinito «pequeño») o con el propio $\mathbb{R}$ (si es «grande»).

La hipótesis del continuo es la pregunta más simple que queda por resolver en relación con los infinitos. Se considera de especial relevancia, y el matemático alemán David Hilbert la situó a la cabeza de su famosa lista de 23 grandes problemas matemáticos, presentada en 1900 en el Congreso Internacional de Matemáticos celebrado en París. Más de un siglo después de que se formulara esta cuestión, aún no hemos logrado resolverla de manera concluyente: nunca se ha encontrado un subconjunto infinito de $\mathbb{R}$ que no podamos poner en biyección con $\mathbb{N}$ o con $\mathbb{R}$, pero tampoco se ha demostrado que no exista tal subconjunto.

No obstante, los lógicos han obtenido resultados interesantes, que en un primer momento no hicieron sino acrecentar el

misterio. Versan sobre la teoría de conjuntos, que se formalizó a principios del siglo xx y se basa en un sistema de axiomas desarrollado por varios investigadores, en especial los alemanes Ernst Zermelo y Abraham Fraenkel. Dicho sistema de axiomas se conoce como ZFC, a partir de las iniciales de esos dos matemáticos, mientras que la C hace referencia al axioma de elección (*choice*, en inglés), que tiene un estatus especial. (Este axioma estipula que, para toda colección de conjuntos no vacíos, siempre existe un conjunto que tiene exactamente un elemento en común con cada uno de ellos.)

En 1938, el lógico austríaco Kurt Gödel demostró que, si la teoría de conjuntos erigida sobre el sistema ZFC es no contradictoria (es decir, no conduce a una afirmación y a la contraria), dicha teoría no puede demostrar que la hipótesis del continuo sea falsa. En otras palabras, si HC denota la hipótesis del continuo («no existe un infinito intermedio entre el de ℕ y el de ℝ») y no-HC, su negación («existe un infinito intermedio entre el de ℕ y el de ℝ»), la teoría ZFC no puede demostrar no-HC.

La sorpresa llegó en 1963, cuando el matemático estadounidense Paul Cohen probó que, si la teoría ZFC es no contradictoria, entonces tampoco puede demostrar HC. Si juntamos este resultado con el de 1938, la conclusión es que la hipótesis del continuo es independiente de los axiomas ZFC desde el punto de vista lógico. Es decir, que se trata de un enunciado indecidible en la teoría ZFC.

Una posible interpretación de esta independencia respecto a los axiomas ZFC es que los matemáticos pueden elegir a voluntad si añaden la hipótesis del continuo (HC) o su negación (no-HC) como nuevo axioma de la teoría. Pero esto es incompatible con la idea de que existe una realidad conjuntista única, y por eso la rechazó el propio Gödel. Para él, la indecidibilidad de la hipótesis del continuo en la teoría ZFC significaba que los axiomas ZFC no daban una descripción completa de esa realidad conjuntista en la que, como muchos otros matemáticos, creía. Y de ahí surge un proyecto: encontrar nuevos axiomas y añadirlos al sistema ZFC hasta que nos permitan averiguar si la hipótesis del continuo es verdadera o no.

AXIOMAS

La hipótesis del continuo y los cardinales grandes

La hipótesis del continuo fue planteada por Georg Cantor. Afirma que entre el infinito de los números naturales (el infinito numerable) y el de los números reales (el del continuo) no existe otro infinito.

No tenemos una intuición clara sobre la verdad o falsedad de la hipótesis del continuo, al contrario de lo que ocurre con los «axiomas de cardinales grandes», que afirman la existencia de conjuntos infinitos muy grandes, como los infinitos cada vez mayores de la lista ℕ, $\mathcal{P}(\mathbb{N})$, $\mathcal{P}(\mathcal{P}(\mathbb{N}))$... (donde $\mathcal{P}(\mathbb{N})$ es el conjunto de las partes de ℕ, *véase el texto principal*).

Hay diversos axiomas de cardinales grandes. Los consideramos ciertos *a priori*, porque rechazarlos implicaría limitar el infinito, algo que parece absurdo. Estos axiomas permiten demostrar resultados que no sería posible obtener sin ellos, incluidos algunos relacionados con los números naturales.

El matemático Alexander Grothendieck usó estos axiomas en sus trabajos sobre la teoría de categorías, y la demostración del último teorema de Fermat (según el cual no existen enteros positivos x, y, z tales que $x^n + y^n = z^n$ para ningún n natural mayor que 2) parecía depender de ellos, al menos en un primer momento.

Se esperaba que ciertos axiomas de cardinales grandes implicarían la verdad o falsedad de la hipótesis del continuo. Lamentablemente, se ha establecido que eso no ocurre, así que seguimos buscando nuevos axiomas naturales que arrojen luz sobre este misterio.



Georg Cantor (1845-1918).

WIKIMEDIA COMMONS/DOMINIO PÚBLICO

EL UNIVERSO CONJUNTISTA

Ciertos axiomas contemplados (incluso por el propio Gödel) para completar la teoría ZFC no resultan satisfactorios porque carecen de un fundamento intuitivo. Es por eso que añadir HC o no-HC como axioma no se considera una solución: nuestra intuición no nos sugiere nada realmente claro sobre la hipótesis del continuo. Así pues, el problema estriba en encontrar buenos axiomas.

Para entender las nuevas ideas introducidas por Woodin, necesitamos explicar brevemente de qué está hecho el universo conjuntista descubierto por Cantor. La columna vertebral de este universo viene dada por la secuencia de los «ordinales», que son los números que permiten contar en orden progresivo los elementos de un conjunto, sea finito o infinito. Esta secuencia comienza con los números naturales, definidos de forma conjuntista y denominados en este contexto «naturales de Von Neumann». Se construyen a partir del conjunto vacío ∅ (aquel que no contiene nada) de la manera siguiente: $0 = \varnothing$, $1 = \{\varnothing\}$, $2 = \{\varnothing, \{\varnothing\}\}$, ..., $n + 1 = n \cup \{n\}$, ..., donde ∪ denota la unión de conjuntos. Es fácil ver que, en esta representación, el número natural n está constituido por los naturales que van de 0 a $n-1$, es decir, $n = \{0, 1, ..., n - 1\}$.

Pero los ordinales no se detienen en los números naturales. El primer ordinal infinito (también llamado transfinito) se representa mediante la letra griega ω (omega) y se obtiene tomando de golpe todos los números naturales: $\omega = \{0, 1, 2, ...\}$.

A partir de ahí, podemos continuar con $\omega + 1 = \omega \cup \{\omega\}$, $\omega + 2 = (\omega + 1) \cup \{\omega + 1\}$, etc. Así llegamos a $\omega + \omega$, que denotamos como $\omega \cdot 2$, más tarde a $\omega \cdot 3$, y así sucesivamente. Y más allá todavía, obtenemos $\omega \cdot \omega = \omega^2$, ω^3, ..., ω^ω, etc.

Observemos que hay dos tipos de ordinales: los que tienen un predecesor (un ordinal inmediatamente anterior a ellos), como $\omega + 1$ u $\omega^3 + 32$, y los que no lo tienen, por ejemplo ω, $\omega \cdot 2$ u ω^4. A estos últimos se les llama «ordinales límite».

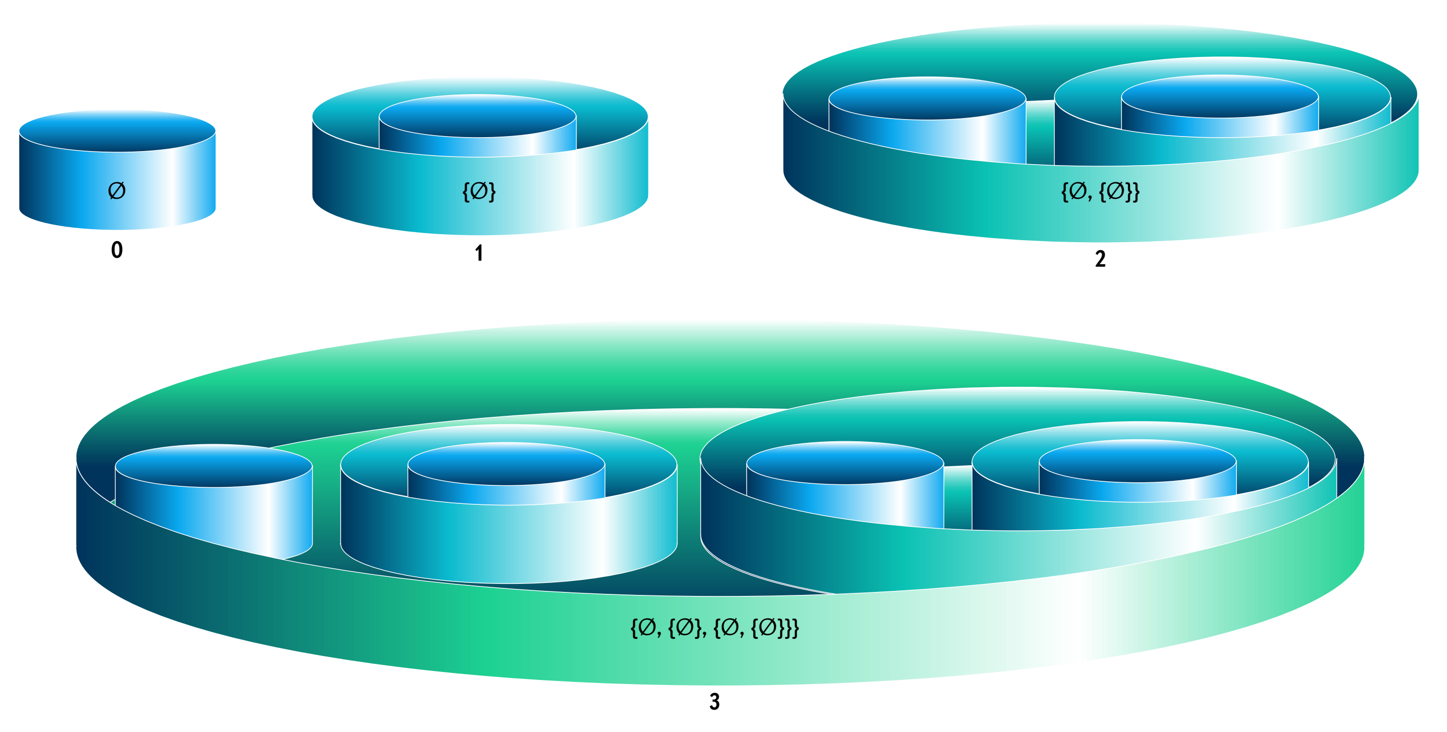
Con los ordinales y la operación $\mathcal{P}$, que al actuar sobre un conjunto E nos da el conjunto $\mathcal{P}(E)$ de sus partes, obtenemos una jerarquía de conjuntos anidados, que jugará un papel central en nuestra discusión. Escribimos:

$V_0 = \varnothing$;

$V_{\alpha+1} = \mathcal{P}(V_\alpha)$, si $\alpha + 1$ es un ordinal con predecesor α;

V_β = la unión de todos los V_α tales que $\alpha < \beta$, si β es un ordinal límite.

Por lo tanto, los V_α son conjuntos de conjuntos cada vez más grandes. Constituyen la totalidad del universo conjuntista. De



REPRESENTACIÓN GRÁFICA de los primeros «naturales de Von Neumann», es decir, números naturales definidos a partir de conjuntos.

hecho, la teoría ZFC permite demostrar que todo conjunto está en uno de los V_α. Por ejemplo, el conjunto ℕ de los números naturales está en V_ω, mientras que el conjunto ℝ de números reales aparece más adelante; el conjunto $\mathcal{P}(\mathbb{R})$ de las partes de ℝ, aún un poco más lejos, etc.

Representaremos mediante V el universo conjuntista obtenido al tomar todos los V_α. Como cualquier conjunto está en uno de los V_α, todo proviene del conjunto vacío ∅: el universo conjuntista está formado por el vacío y por aquello que implica su presencia.

Regresemos ahora a 1938, cuando Gödel demostró que de los axiomas ZFC no se deduce no-HC. La idea de la demostración es fácil de entender, aunque no lo sean todos sus detalles. Gödel partió de la hipótesis de que la teoría ZFC no es contradictoria. Así pues, en virtud del teorema de completitud que él mismo demostró en 1929, existe una estructura que satisface todos los axiomas ZFC (*véase el recuadro* «Estructuras y consistencia relativa»). A partir de ella, Gödel dedujo otra estructura que verificaba los axiomas ZFC y también la hipótesis del continuo. Eso demostraba que el sistema ZFC + HC era no contradictorio y, por lo tanto, que no se podía deducir no-HC a partir del sistema ZFC. (En efecto: si no-HC pudiera deducirse del sistema ZFC, también podría deducirse del sistema ZFC + HC, por lo que tendríamos HC y no-HC al mismo tiempo, lo cual sería contradictorio.)

¿Cómo obtuvo Gödel la estructura en cuestión? La idea de su método es análoga a otra que se emplea a menudo en álgebra: partiendo de una estructura que verifica (por ejemplo) los axiomas de grupo, como el conjunto de los números reales con la operación suma, consideramos todos los elementos cuya existencia se deduce de la de un elemento particular. Así, si elegimos el número 1, deducimos la subestructura constituida por 1, –1, 1 + 1, 1 + 1 + 1, etc., que es el «subgrupo generado por 1». En este ejemplo, el método nos proporciona ℤ, el conjunto de los números enteros.

UN UNIVERSO MÁS REDUCIDO

Dicho de otra manera, la idea es comenzar con una estructura que verifica ciertos axiomas y, a partir de ella, deducir una estructura más pequeña que también los satisfaga y que además pueda tener otras propiedades interesantes.

Así pues, el método de Gödel parte del universo V descrito anteriormente, que verifica los axiomas ZFC. Para definir una subestructura, que llamaremos L, se inspiró en la definición de los V_α, modificándola ligeramente:

$L_0 = \varnothing$;

$L_{\alpha+1} = \mathcal{P}_{\text{def}}(L_\alpha)$, si $\alpha + 1$ es un ordinal con predecesor α;

L_β = la unión de todos los L_α tales que $\alpha < \beta$, si β es un ordinal límite.

Aquí $\mathcal{P}_{\text{def}}(E)$ designa el conjunto de los subconjuntos «constructibles» del conjunto E, es decir, definibles mediante una fórmula (una expresión escrita en el lenguaje formal de la teoría de conjuntos) cuyos parámetros están en E. Si tomamos, pongamos por caso, el conjunto ℕ = {0, 1, 2, 3, ...}, un ejemplo sencillo de subconjunto constructible de ℕ sería el conjunto X formado por los elementos x de ℕ tales que existe un y de ℕ que satisface $x + y = 5$ (todo ello se puede traducir a una fórmula). En este caso tenemos $X = \{0, 1, 2, 3, 4, 5\}$.

La diferencia entre $\mathcal{P}_{\text{def}}(E)$ y $\mathcal{P}(E)$ se debe a que, en general, ciertos subconjuntos de un conjunto E no se pueden caracterizar mediante una definición. Por ejemplo, aunque hay una infinidad no numerable de subconjuntos de ℕ, solo hay una infinidad numerable de ellos que sean definibles (porque solo existe una infinidad numerable de fórmulas).

La unión de todos los L_α, denotada por L, es el universo de los conjuntos constructibles. Se trata de un universo conjuntista incluido en V, en el que se cumplen todos los axiomas ZFC. El punto importante demostrado por Gödel es que la hipótesis del continuo es verdadera en L. Por lo tanto, el método de Gödel muestra que, partiendo de una estructura que verifica el sistema ZFC, sabemos encontrar una subestructura que verifica

ZFC + HC; en consecuencia, prueba que, si el sistema ZFC es no contradictorio, entonces ZFC + HC es no contradictorio.

Este resultado de Gödel sugiere que podríamos añadir al sistema ZFC el axioma que afirma que todo conjunto es constructible, lo que se escribe como $V = L$, y entonces la hipótesis del continuo sería cierta. Así que, a primera vista, $V = L$ podría ser el axioma que buscábamos para completar la teoría ZFC y acabar con la indecidibilidad de HC. Pero deberíamos tener argumentos de peso que nos incitaran a admitirlo como axioma. El argumento de que cualquier conjunto debe ser definible a partir de los que vienen antes que él es una justificación intuitiva que tal vez consideró el propio Gödel. Por desgracia, veremos que, en última instancia, la idea de adoptar $V = L$ como nuevo axioma no es defendible.

Desde el punto de vista de un matemático convencido de que los conjuntos existen y, por consiguiente, existe una verdad única sobre ellos, no se puede pensar en añadir como axioma una fórmula que resulta indecidible en el sistema ZFC (una fórmula es un enunciado, en el contexto de la lógica). Un nuevo axioma debe afirmar una propiedad cuyo significado percibamos claramente y que se imponga a partir de la idea que nos hemos hecho de los conjuntos. El hecho de que un posible axioma no introduzca ninguna contradicción no basta para adoptarlo.

El ejemplo más sencillo para entender esto nos lo brinda el segundo teorema de incompletitud de Gödel, publicado en 1931 [*véase* «Gödel, Hilbert y el teorema de incompletitud», por José Manuel Sánchez Ron. Investigación y Ciencia, julio de 2019]. Este teorema indica que la no contradicción de un sistema S lo bastante potente como para englobar la aritmética habitual (por ejemplo, el sistema ZFC), de ser cierta, no puede demostrarse dentro del propio sistema S. Eso significa que podemos añadir a S la afirmación «S es contradictorio» sin introducir ninguna contradicción. Sin embargo, sería absurdo hacerlo, puesto que al adoptar y usar el sistema S estamos asumiendo *a priori* que no es contradictorio.

CARDINALES GRANDES

Los criterios para juzgar si una fórmula (un enunciado) se puede añadir o no como axioma son objeto de delicadas discusiones. Pero hay algo en lo que todo el mundo coincide: si una fórmula afirma la existencia de grandes conjuntos infinitos y no introduce ninguna contradicción, hay que aceptarla. Si realmente existe un universo de los conjuntos, será lo más grande posible, así que debemos aceptar todo lo que afirme que es grande.

Conocemos desde hace mucho tiempo afirmaciones que expresan la existencia de grandes conjuntos infinitos: los llamados «axiomas de cardinales grandes» [*véase* «Juegos infinitos y conjuntos grandes», por Jean-Paul Delahaye. Investigación y Ciencia, julio de 1999]. El primero de estos enunciados es el axioma del infinito, según el cual existe un conjunto infinito, y que puede enunciarse como «existe un conjunto que puede ponerse en biyección con uno de sus subconjuntos propios [es decir, no idénticos a sí mismo]». La definición precisa de estos axiomas queda fuera del alcance de este artículo, pero cabe señalar que hay muchos y se refieren a diversos tipos de conjuntos grandes (cardinales inaccesibles, cardinales medibles, cardinales supercompactos, etc.). Comentaremos varios aspectos del papel que juegan en el estudio del infinito.

Con los cardinales grandes ocurre algo casi milagroso. Aunque las propiedades que los definen no guardan relación directa

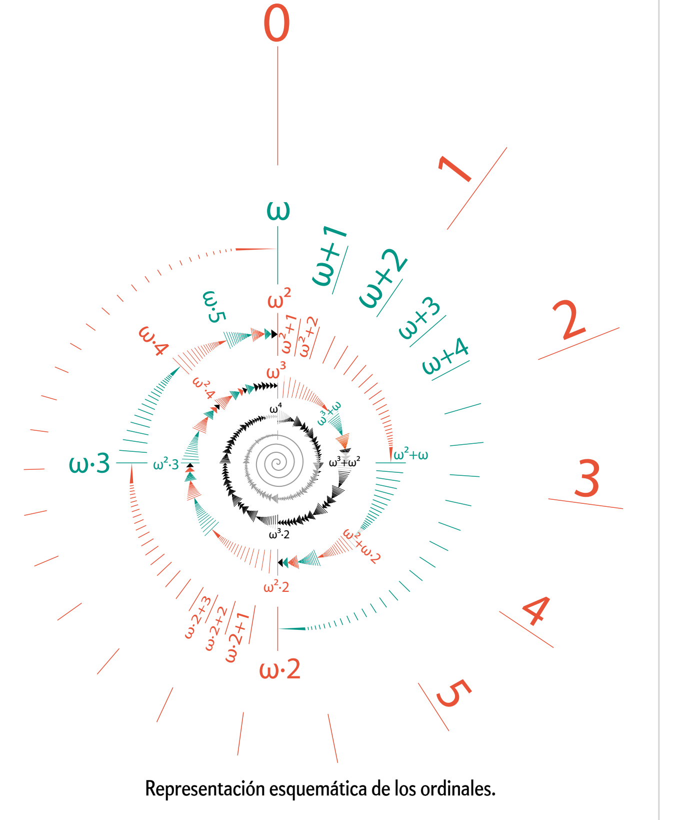
ORDINALES

La vía del *L* último

Los ordinales son una generalización de los números naturales (muy diferente de la que constituyen los números reales) que permite abordar seriamente los infinitos y su orden. Se introduce un nuevo número ω tras la serie ordenada de los números naturales. La cosa no acaba aquí y, del mismo modo que después del 0 viene el 1, después de ω viene $\omega + 1$, luego $\omega + 2$, y así sucesivamente. Más allá de esta segunda serie infinita tenemos $\omega \cdot 2$, luego $\omega \cdot 3$, etc. La imagen que acompaña a este texto es un intento de representar los ordinales.

Estos ordinales se pueden definir a partir del conjunto vacío y llevamos tratando de entender la estructura que forman desde que los descubrió Cantor. En particular, los usamos para definir los conjuntos V_α, cada vez más grandes, que componen el universo conjuntista en su totalidad, denotado por V.

Jugando con la definición de los V_α, construimos subuniversos del mundo conjuntista (hablamos de «modelos internos») que, si bien son más pequeños que V, poseen sus propiedades fundamentales. Gödel usó uno de estos subuniversos, L, para demostrar que la teoría usual de conjuntos es compatible con la hipótesis del continuo (HC). Pero Paul Cohen demostró que también es compatible con su negación (no-HC). Recientemente, la idea empleada para definir L se ha retomado bajo el nombre de «L último» y parece que podría proporcionar una solución al problema. Finalmente, la hipótesis del continuo sería verdadera.



Representación esquemática de los ordinales.

INDECIDIBILIDAD

Estructuras y consistencia relativa

Un resultado básico para trabajar con sistemas axiomáticos es el teorema de completitud, que Kurt Gödel demostró en 1929 en su tesis doctoral, antes de hacer lo propio con sus famosos teoremas de incompletitud.

El teorema de completitud afirma que una teoría definida por axiomas lógicos es no contradictoria si y solo si existe al menos una estructura que satisface todos sus axiomas.

Por ejemplo, el axioma «para todo *x*, existe un *y* tal que $x < y$» es no contradictorio, porque se satisface si consideramos la estructura ℕ (los números naturales) y suponemos que < es la relación de orden habitual en ℕ.

Si tenemos un sistema de axiomas más complicado, no es tan fácil encontrar una estructura que los verifique. Para la teoría de conjuntos, recurrimos al método de «consistencia relativa»: suponemos que un sistema *S* de axiomas es no contradictorio; deducimos, a partir del teorema de completitud, que existe una estructura *M* que satisface todos los axiomas de *S*; pasamos de *M* a *M*', de modo que *M*' verifique un axioma más, que denominaremos *X*; la existencia de esta estructura *M*' muestra que el sistema *S* + *X* es no contradictorio. Así pues, esta construcción demuestra la implicación

S es no contradictorio ⇒
S + *X* es no contradictorio.

Este es el método que utilizaron Kurt Gödel (en 1938) y Paul Cohen (en 1963) para demostrar, respectivamente, que

ZFC es no contradictorio ⇒
ZFC + HC es no contradictorio

y que

ZFC es no contradictorio ⇒
ZFC + no-HC es no contradictorio.



Kurt Gödel (1906-1978).

entre sí y, en principio, podría ser que dos cardinales grandes no pudieran compararse (es decir, que ninguno de ellos fuera mayor que el otro), esto nunca sucede: los cardinales grandes se ordenan en una línea, del más pequeño al más grande.

Woodin y muchos matemáticos ven en este hecho un argumento para creer que los conjuntos existen realmente: si tras las fórmulas que definen los cardinales grandes no hubiera alguna realidad, resultaría incomprensible que se alinearan siguiendo un orden bien definido.

Esperábamos encontrar un axioma de cardinal grande que tuviese repercusiones sobre la hipótesis del continuo, pero más adelante se demostró que eso era imposible. Así que la solución al problema que plantea la hipótesis del continuo no puede provenir directamente de los cardinales grandes.

Es más, los cardinales grandes condenan sin remedio al axioma $V = L$, que habíamos mencionado antes como una posible solución a dicho problema. En 1961, el matemático y científico computacional estadounidense Dana Scott demostró que si adoptamos como axioma $V = L$, entonces no pueden existir los cardinales medibles.

Eso significa que no podemos adoptar todos los axiomas de cardinales grandes (como creemos que es necesario hacer) y el axioma $V = L$ al mismo tiempo. Woodin no duda en afirmar que el resultado de Scott implica la falsedad de $V = L$.

UNA VARIANTE DE *L*

A fin de encontrar una salida, los matemáticos y los lógicos han considerado variantes de *L*, basadas en definiciones que emplean el mismo principio que la de *L*: fijar un criterio constructivo para pasar de L_α a $L_{\alpha+1}$, pero menos restrictivo, de modo que los conjuntos L_α sean más grandes que los definidos por Gödel.

Esta idea ha permitido resolver el problema de los cardinales medibles. El lógico estadounidense Robert Solovay concibió en

MULTIVERSO CONJUNTISTA

Realismo pluralista o no pluralista

En la filosofía de las matemáticas, los realistas sostienen que el mundo matemático existe y que el trabajo de los matemáticos consiste en descubrirlo [*véase* «¿Son reales las matemáticas?», por Kelsey Houston-Edwards. Investigación y Ciencia, noviembre de 2019]. Puesto que las teorías más potentes y utilizadas se basan en nociones de conjuntos y que todo, en cierto modo, se reduce a ellas, hoy en día resulta bastante natural postular el realismo matemático a partir de la teoría de conjuntos; es decir, defendiendo la idea de que los conjuntos (en particular los infinitos) existen.

Ante el problema de la hipótesis del continuo y de su indecidibilidad respecto a los axiomas habituales de la teoría de conjuntos, una versión del realismo conjuntista sostiene que el universo de las matemáticas existe bajo una multitud de formas. En algunas de ellas se cumple la hipótesis del continuo, y en otras, no. Este «multiverso conjuntista» nos eximiría de buscar de un valor de verdad («verdadera» o «falsa») para la hipótesis del continuo.

Hugh Woodin se opone a esta versión excesivamente fácil del realismo con argumentos técnicos que muestran que en ese supuesto multiverso no hay ninguna noción de verdad que resulte satisfactoria. Para él, como para Gödel, existe un solo universo conjuntista, para el que debemos encontrar los axiomas correctos. Woodin persigue ese fin con ahínco, y defiende que la vía abierta por el «*L* último» tiene muchas posibilidades de resolver el problema de una vez por todas.

1976 una versión de L que no contradice la existencia de dichos cardinales. Desgraciadamente, este nuevo L sí entra en contradicción con otros axiomas de cardinales grandes más elevados en la jerarquía. A raíz de ello, la variante de $V = L$ de Solovay no resulta más admisible que la de Gödel.

Este proceso de extensión de L se ha repetido en diversas ocasiones, pero la nueva versión de $V = L$ siempre se ha revelado incompatible con ciertos axiomas de cardinales grandes. Parecía un callejón sin salida.

Sin embargo, en 2010 se produjo un enorme avance: Woodin demostró que si encontramos una variante de $V = L$ compatible con la existencia de un cardinal supercompacto, será necesariamente compatible con todos los axiomas de cardinales grandes.

Así que hoy se busca este L, que se conoce como L último. Disponemos de pistas prometedoras para lograrlo y, sobre todo, sabemos (gracias a otro resultado de Woodin) que el axioma $V = L$ último tendría como consecuencia la veracidad de la hipótesis del continuo.

Un argumento adicional a favor del axioma $V = L$ último es el siguiente: Woodin demostró en 2015 que este axioma dejaría sin efecto el «forzamiento» (*forcing*), la técnica en la que se basó Cohen para demostrar que no-HC es compatible con la teoría ZFC. El forzamiento consiste en construir una estructura que verifique ZFC + no-HC a partir de otra que satisface los axiomas ZFC. Pero esta técnica es muy potente y permite hacer muchas otras cosas, en particular, construir una estructura que verifique los axiomas ZFC y HC (igual que el método de Gödel). Es decir, que el forzamiento demuestra por sí solo la indecidibilidad de la hipótesis del continuo en el sistema ZFC. Además, también revela la indecidibilidad de otros enunciados matemáticos relacionados con el álgebra, el análisis, etc., en la teoría ZFC.

Para Woodin, estas afirmaciones indecidibles producen una situación muy insatisfactoria: ¿cómo es posible que esta ciencia, las matemáticas basadas en los axiomas ZFC, sea incapaz de decir si muchos de sus enunciados son verdaderos o falsos? Esta situación sugiere un nuevo criterio para juzgar si la adición de un axioma X al sistema ZFC es bienvenida o no: lo será si deja sin efecto el forzamiento de Cohen; en otras palabras, si al añadir X a la teoría ZFC, el forzamiento ya no nos permite elegir a voluntad si asumimos la hipótesis del continuo o su negación (o, de modo más general, si asumimos A o no-A para cualquier enunciado matemático A que el forzamiento muestre indecidible en la teoría ZFC).

Woodin ha demostrado que el axioma $V = L$ último dejaría sin efecto el forzamiento. Con el L último, una serie de cuestiones indecidibles en la teoría ZFC tomarían un determinado valor de verdad. Por lo tanto, el ansiado axioma $V = L$ último no solo sería compatible con todos los axiomas de cardinales grandes (lo cual es un requisito previo), sino que también limitaría la impotencia de las matemáticas basadas en la teoría ZFC para determinar la veracidad o falsedad de toda una clase de enunciados interesantes. Así que hay una serie de poderosas razones para adoptar el axioma $V = L$ último.

EN BUSCA DEL *L* ÚLTIMO

No obstante, la situación no está ni mucho menos resuelta. De hecho, aún hay que encontrar la definición de L último que hace que el axioma $V = L$ último sea compatible con la existencia de cardinales grandes supercompactos. Se están explorando varias pistas prometedoras y cabe esperar que los matemáticos hallen pronto un argumento de peso que les permita, al fin, afirmar que la hipótesis del continuo es cierta, y que acabe también con la indecidibilidad de otros enunciados matemáticos.

Los notables avances acaecidos en el último decenio confirman que la comprensión del infinito es un trabajo matemático que progresa de manera regular y sustancial. Ha quedado patente que el descubrimiento de verdades matemáticas no consiste solo en elaborar demostraciones a partir de axiomas evidentes, fáciles de formular y jamás cuestionados, sino que también es el resultado de discutir y refinar nuestra concepción del infinito.

Y esa discusión se nutre tanto de teoremas como de puntos de vista que refuerzan nuestra intuición. Así, ciertas opciones que podrían proponer los matemáticos se descartan no porque se demuestre que son absurdas en términos lógicos, sino porque no resultan satisfactorias intelectualmente (como adoptar de manera drástica el axioma $V = L$). El infinito matemático se

---

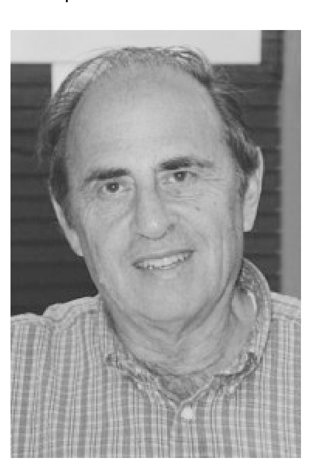
FORZAMIENTO Y *L* ÚLTIMO

Decidir lo indecidible

El forzamiento (*forcing*) es un método diseñado por Paul Cohen para demostrar que no-HC (la negación de la hipótesis del continuo) es compatible con la teoría ZFC. Es muy potente, hasta tal punto que no solo permite demostrar que no-HC es compatible con la teoría ZFC, sino también que lo es HC. Demuestra, por consiguiente, que la hipótesis del continuo es un enunciado indecidible en la teoría ZFC.

El forzamiento también se puede aplicar a otras cuestiones matemáticas importantes (el problema de Whitehead en teoría de grupos, la conjetura de Kaplansky en análisis, el problema de Suslin en combinatoria, la conjetura de Borel en teoría de la medida...) y muestra que también son indecidibles dentro de la teoría ZFC.

Todo ello confirma que es necesario añadir axiomas al sistema ZFC y, si es posible, hacerlo de modo que deje de funcionar el forzamiento. Un axioma X conseguiría eso si ya no fuera posible demostrar que tanto HC (u otro de los problemas mencionados) como su negación son compatibles con el sistema ZFC + X; en otras palabras, si la adición de X a los axiomas ZFC fijara un valor de verdad para HC (o para uno de los otros problemas).



Paul Cohen (1934-2007).

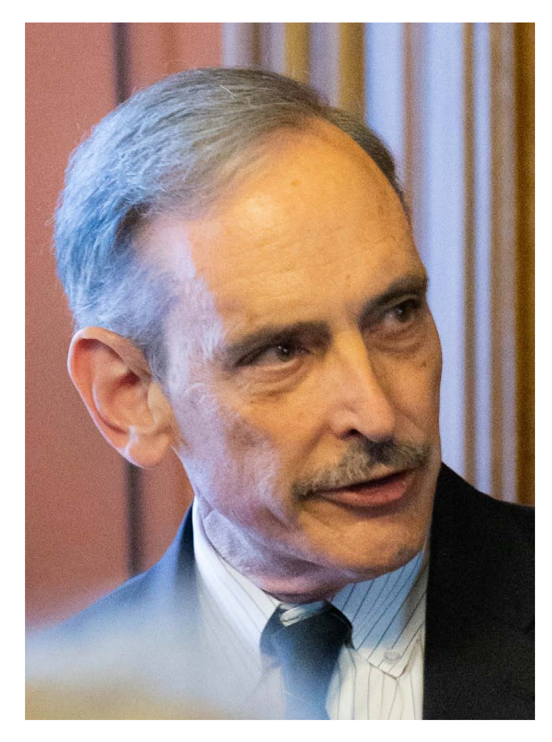
Hugh Woodin ha podido establecer que el axioma $V = L$ último que contempla sería compatible con los axiomas de cardinales grandes, al tiempo que dejaría sin efecto el forzamiento. Sería, pues, un axioma totalmente satisfactorio para eliminar la vaguedad que persiste en la teoría ZFC. La nueva teoría de conjuntos demostraría que la hipótesis del continuo es cierta y se convertiría, según Woodin, en la más razonable de las teorías de conjuntos.

Hugh Woodin y los cardinales grandes

Para Hugh Woodin, la jerarquía de los cardinales grandes (grandes conjuntos infinitos cuya existencia se postula mediante axiomas complementarios a los habituales axiomas ZFC de la teoría de conjuntos) es tan intrínseca y absoluta como la de los números naturales.

Woodin sostiene que se trata de un gran descubrimiento. Está convencido de que los axiomas de cardinales grandes nunca conducirán a una contradicción. Y eso implica que los enunciados sobre números naturales que se demuestran a partir de dichos axiomas son verdaderos y, por lo tanto, que los axiomas tienen consecuencias concretas, físicas.

Así lo afirmaba en «El universo transfinito» (un capítulo del libro colectivo *Kurt Gödel y los fundamentos de las matemáticas*, publicado en 2011): «En los próximos diez mil años, no se descubrirá ninguna contradicción en estas teorías [que afirman la existencia de cardinales grandes]. Esta es una predicción específica e inequívoca sobre el universo físico [...] que no surge de una reducción a una verdad previamente conocida [...] Es una predicción realmente nueva que hago basándome en el desarrollo de la teoría de conjuntos en los últimos cincuenta años y en mi creencia de que la concepción del universo transfinito de conjuntos es válida. Por último, hago esta predicción con independencia de cualquier especulación sobre los dispositivos informáticos que podrían desarrollarse en los próximos diez mil años y que aumentarían la eficacia de la investigación en matemáticas».



Hugh Woodin

muestra inteligible y nuestros conocimientos sobre él aumentan año tras año.

CONSECUENCIAS CONCRETAS

Los progresos de la teoría de conjuntos en el último medio siglo han llevado a Woodin a sostener que la teoría de los cardinales grandes y las investigaciones sobre axiomas complementarios al sistema ZFC no son un trabajo puramente abstracto, alejado del mundo. Según el, la nueva comprensión del infinito que resulta de esos estudios tiene «consecuencias físicas».

Los axiomas de cardinales grandes exhiben una jerarquía, y cuando un axioma X es más fuerte que otro axioma Y, entonces X permite demostrar el enunciado «el sistema ZFC + Y es no contradictorio». Esta afirmación se expresa en la teoría por medio de una serie de símbolos, y saber si puede demostrarse es una cuestión meramente combinatoria, que siempre sabemos convertir en una pregunta sobre los números naturales. Aunque parezca sorprendente, los axiomas de cardinales grandes influyen en lo que sabemos demostrar sobre los números naturales: el infinito se vale de lo finito y cuantos más infinitos tengamos, más sabremos sobre lo finito.

Estos efectos sobre los enunciados aritméticos pueden, en cierto modo, comprobarse físicamente. Pensar que un axioma de cardinal grande X es aceptable (y Woodin afirma que muchos lo son) implica que podemos usar la teoría ZFC + X con la seguridad de que nunca caeremos en una contradicción.

Pero usar una teoría equivale a mostrar las consecuencias de sus axiomas, y esa es una tarea que podemos confiar a una máquina. Así, creer en la existencia de un cardinal grande es creer que las máquinas que empleen el sistema ZFC completado con el axioma correspondiente a dicho cardinal grande nunca producirán resultados contradictorios como 0 = 1. Estamos, pues, frente a un enunciado sobre el mundo físico que proviene exclusivamente de nuestra comprensión del infinito. Dicho de otro modo: los progresos en la teoría de conjuntos amplían lo que podemos decir sobre el infinito y, por lo tanto, sobre el mundo físico. Estos avances de matemáticos y lógicos tejen un hilo que conecta el infinito más grande con la realidad material, abarcando desde los objetos más abstractos a los más concretos. IyC

PARA SABER MÁS

Strong axioms of infinity and the search for *V*. W. Hugh Woodin en *Proceedings of the International Congress of Mathematicians 2010*, págs. 504-528, 2011.
Infinity: New research frontiers. Michael Heller y W. Hugh Woodin (editores). Cambridge University Press, 2011.
The continuum hypothesis and the search for mathematical infinity. W. Hugh Woodin. Conferencia impartida en el Centro de Estudios Interdisciplinarios Copérnico de Cracovia, enero de 2015. Disponible en **https://www.youtube.com/watch?v=nVF4N1Ix5WI**
How Woodin changed his mind: New thoughts on the continuum hypothesis. Colin J. Rittberg en *Archive for History of Exact Sciences*, vol. 69, n.º 2, págs. 125-151, marzo de 2015.
Set-theoretic geology, the ultimate inner model, and new axioms. J. Cavitt. Tesis de grado, Universidad Harvard, marzo de 2017. Disponible en **https://www.math.harvard.edu/media/cavitt.pdf**.
In search of ultimate-*L*. The 19th Midrasha Mathematicae lectures. W. Hugh Woodin en *Bulletin of Symbolic Logic*, vol. 23, n.º 1, págs. 1-109, marzo de 2017.

EN NUESTRO ARCHIVO

Georg Cantor y la teoría de conjuntos transfinitos. Joseph W. Dauben en *IyC*, agosto de 1983.
El carácter paradójico del infinito. Jean-Paul Delahaye en *Ideas del infinito*, colección *Temas* de *IyC* n.º 23, 2001.
El programa de Woodin. Agustín Rayo y Alejandro Pérez Carballo en *IyC*, febrero de 2011.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



¿Cómo funcionan las mascarillas de protección respiratoria?

La pandemia de COVID-19 ha reavivado el interés por las mascarillas protectoras. ¿Cómo actúan estos dispositivos?

Mascarillas FFP2 estándar, quirúrgicas o incluso de fabricación casera. Estas palabras han invadido nuestro día a raíz de la pandemia de COVID-19. Como físicos, no nos corresponde a nosotros dar recomendaciones sobre su uso para minimizar el riesgo de contagio. Sin embargo, sí podemos aportar información sobre los mecanismos que intervienen en su funcionamiento. Puede que muchos piensen que estos dispositivos actúan principalmente como un tamiz. Sin embargo, nada más lejos de la realidad.

Cuando tosemos, estornudamos, hablamos o simplemente respiramos, producimos aerosoles: partículas de distintos tamaños que acompañan al aire exhalado. Por lo general, se trata de gotículas de agua de entre 1 y 100 micrómetros de diámetro, las cuales se evaporan con rapidez y pueden liberar al aire bacterias (con un tamaño típico de entre 0,5 y 5 micrómetros) y virus (de entre 0,02 y 0,3 micrómetros; el SARS-CoV-2, el virus causante de la COVID-19, presenta un diámetro del orden de 0,1 micrómetros).

Las partículas de mayor tamaño caen al suelo con rapidez. Las más ligeras, en cambio, permanecen en suspensión. En el aire en calma, el tiempo de sedimentación a una altura de 3 metros es de unos 4 minutos para partículas con un diámetro de 20 micrómetros. Ese tiempo se multiplica por cuatro cada vez que el tamaño se divide entre dos. Como consecuencia, las partículas con un diámetro de 5 micrómetros pueden permanecer más de una hora en suspensión.

En una situación de epidemia, el aire puede filtrarse por medio de una mascarilla para proteger nuestro sistema respiratorio de esos aerosoles cargados de patógenos. El primer mecanismo de filtrado que nos viene a la mente es el de un tamiz: como en un colador de cocina, solo



UNA MASCARILLA QUIRÚRGICA (*izquierda*) evita que las gotas de saliva del portador se dispersen al medio. Por su parte, las mascarillas de tipo FFP (*derecha*), siempre que estén correctamente ajustadas, pueden bloquear las partículas presentes en el aire inspirado.

BRUNO VACARO

las partículas con un tamaño inferior al de los agujeros pasarían a través de la mascarilla.

No obstante, basar un filtro en este principio entraña un inconveniente: cuanto más pequeños sean los agujeros, mejor será el filtrado, pero más difícil se tornará respirar a través de ellos. Para que la mascarilla pueda usarse sin asistencia mecánica, es necesario evitar un filtro con agujeros submicrométricos, el cual sería necesario para bloquear bacterias y virus. Por fortuna, en el proceso intervienen otros mecanismos que permiten atrapar partículas de todos los tamaños.

Mecanismos de captura

Las mascarillas suelen presentar una fina capa de fibras no tejidas, sino entrelazadas. Cuando una partícula, arrastrada por el aire que pasa a través del filtro, choca con una de esas fibras, se adhiere a ella permanentemente gracias a las llamadas fuerzas de Van der Waals (interacciones entre moléculas distintas de los enlaces químicos). Así pues, el primer paso consiste en entender qué fenómenos pueden conducir a las colisiones entre partículas y fibras.

En las escalas consideradas, es posible demostrar que el flujo de aire está dominado por los efectos de la viscosidad y que es laminar: al acercarse a una fibra, las líneas de flujo de aire se separan, la rodean, y finalmente se unen de nuevo entre sí tras ella.

En una primera aproximación, podemos suponer que las partículas transportadas por el aire siguen dichas líneas. Si la distancia que media entre la fibra y la línea de flujo que transporta la partícula es menor que el radio de esta última, la partícula golpeará la fibra y se adherirá a ella. Este proceso se conoce como captura por intercepción (*véase el recuadro* «Inercia, intercepción y difusión»).

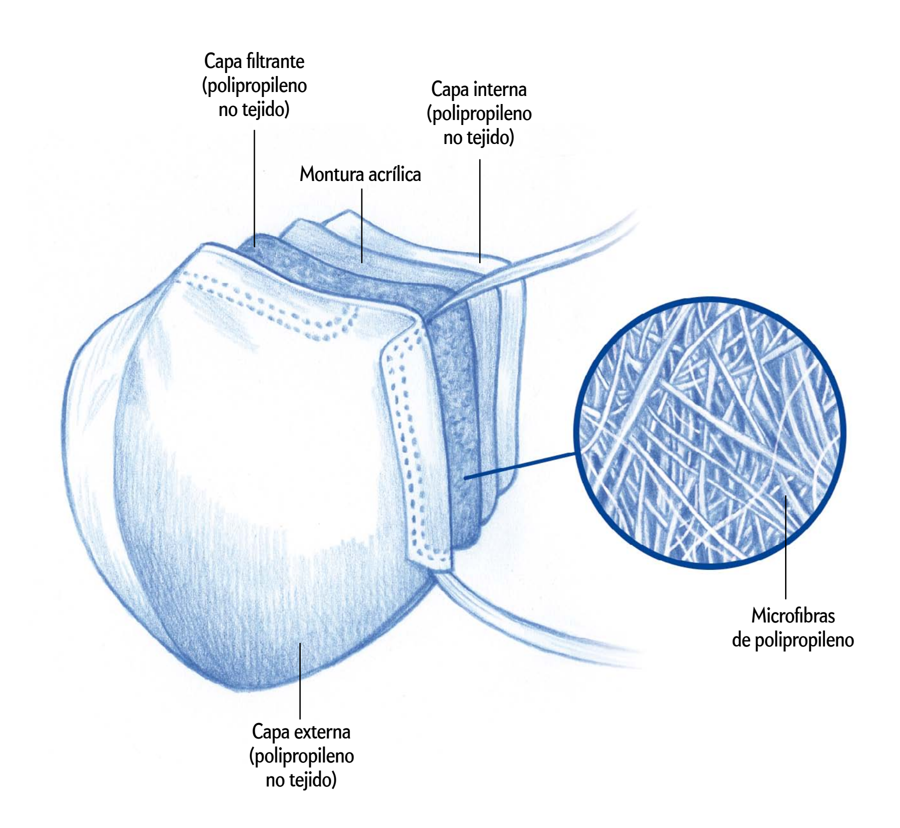
Sin embargo, las partículas no siguen siempre las líneas de flujo de aire. Esto es especialmente cierto en el caso de las partículas de gran tamaño, las cuales presentan una gran inercia debido a su masa. Al igual que un coche que avanza demasiado rápido en una curva, en lugar de rodear la fibra a la par que el aire, las partículas más grandes continuarán «en línea recta» y chocarán contra ella. Este fenómeno se denomina captura por inercia.

Por último, las partículas muy pequeñas tampoco seguirán las líneas de flujo, sino que se verán sujetas a un movimiento browniano debido a los constantes impactos con las moléculas del aire, en permanente agitación térmica. Por tanto, describirán trayectorias erráticas y, cuando pasen cerca de una fibra, podrán difundirse y adherirse a ella. Al contrario de lo que ocurre con la captura por inercia, cuanto menor sea la partícula y más lento el flujo, mayor será el efecto de la captura por difusión.

Además de estos tres mecanismos, las partículas con carga eléctrica pueden experimentar también capturas electrostáticas. Al comparar todos estos fenómenos, puede comprobarse que la eficiencia de un filtro resulta mayor para las partículas muy pequeñas o muy grandes, y menor para las de tamaño intermedio.

Tipos de mascarillas

En la práctica, la parte filtrante de las mascarillas suele estar compuesta de fibras de polipropileno con un diámetro de unos 5 micrómetros, las cuales dejan poros de entre 10 y 20 micrómetros, mucho



PARA EVITAR EL PASO DE AEROSOLES cargados de patógenos, una mascarilla debe tener una capa filtrante lo suficientemente gruesa. También ha de ajustarse bien a la cara a fin de que el aire no entre por los bordes (algo que sí sucede con una simple mascarilla quirúrgica). En particular, si el portador es varón, debe estar afeitado. Estas mascarillas pueden usarse durante unas horas como máximo y luego deben desecharse.

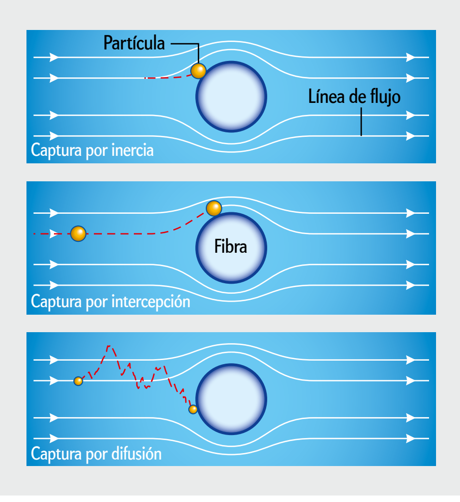
BRUNO VACARO

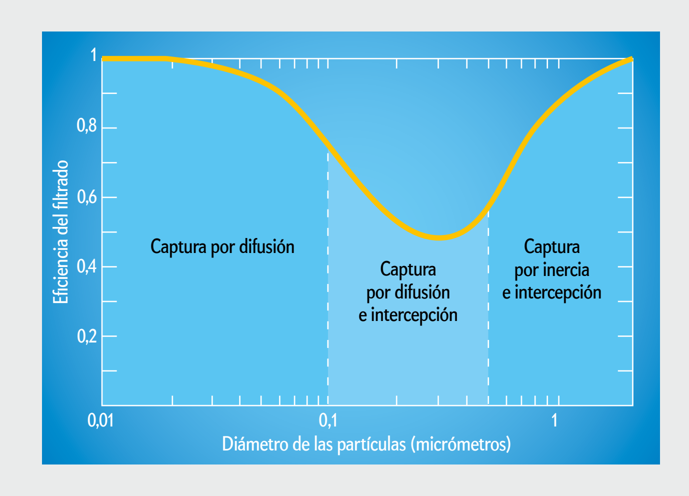
LAS MASCARILLAS Y LA COVID-19

EN EL MOMENTO de escribir este artículo se siguen estudiando los modos de transmisión del SARS-CoV-2, el coronavirus causante de la COVID-19. El pasado 29 de marzo, la Organización Mundial de la Salud publicó un documento científico en el que se resumen los principales resultados al respecto obtenidos hasta la fecha y las recomendaciones consiguientes. Dicha revisión establece que, salvo en situaciones especiales, el contagio se produce sobre todo por medio de gotículas cuyo alcance es del orden de un metro, y no a través de partículas menores que pudieran permanecer suspendidas en el aire y tener un alcance mayor. En este contexto, las mascarillas quirúrgicas serían suficientes en circunstancias ordinarias para evitar la proyección al exterior de dichas gotículas, mientras que las de tipo FFP2 deberían reservarse para situaciones de riesgo médico, ya que además exigen un uso cuidadoso para resultar eficaces.

INERCIA, INTERCEPCIÓN Y DIFUSIÓN

EN FUNCIÓN DEL TAMAÑO DE LAS PARTÍCULAS, las capas filtrantes de las mascarillas operan sobre la base de tres mecanismos principales. La captura por inercia (*izquierda, arriba*) afecta a las partículas de mayor tamaño; en ella la partícula sigue una línea de flujo de aire, pero, debido a su masa, la abandona y continúa «en línea recta» hasta chocar con la fibra y adherirse a ella. En la captura por intercepción (*izquierda, centro*), la partícula sigue una línea de flujo y entrará en contacto con la fibra siempre que su radio sea mayor que la distancia entre la fibra y dicha línea. Por último, las partículas de menor tamaño experimentan un proceso de difusión (*izquierda, abajo*) debido al movimiento browniano, el cual implica una trayectoria errática. Los distintos mecanismos dan como resultado una mayor eficiencia de filtrado para partículas grandes y pequeñas, pero menor para las de tamaño intermedio (*derecha*).





mayores que el tamaño típico de virus y bacterias. La eficacia del filtrado depende por tanto del espesor del filtro: cuanto más grueso sea, mayor será el número de eventos de captura que acabamos de describir.

No obstante, un filtrado eficaz debe enfrentarse a dos problemas: por un lado, dificulta la respiración; por otro, si la mascarilla no se encuentra perfectamente ajustada a la cara, el aire entrará por el espacio adyacente a los bordes. Así pues, la elección de la mascarilla adecuada plantea necesariamente un compromiso entre varios requisitos: calidad del filtrado, facilidad de uso y comodidad del portador.

Existen dos tipos de dispositivos. Por un lado están las mascarillas quirúrgicas, cuyo principal cometido es evitar que las grandes partículas emitidas por el portador, como las gotas de saliva, se dispersen al medio. Estas mascarillas no buscan filtrar las pequeñas partículas presentes en el aire; de hecho, su eficiencia al respecto es muy pobre.

Las pruebas estandarizadas suelen realizarse midiendo qué porcentaje de partículas de 0,06 micrómetros (el tamaño típico de un virus) pasan a través de una mascarilla cuando el flujo se fija en 85 litros por minuto, característico de una respiración muy precipitada. Con las mascarillas quirúrgicas, las tasas varían ampliamente: del 4 al 90 por ciento, debido sobre todo al paso del aire por los bordes de la mascarilla. Estas no resultan satisfactorias en el caso de un contacto prolongado con los pacientes, pero sí pueden serlo en otras circunstancias, ya que bloquean las gotículas de saliva en ambos sentidos y evitan que nos toquemos la cara con las manos.

Otro tipo de dispositivo es el «respirador protector». Estos reciben el nombre genérico de FFP, por las siglas en inglés de «pieza facial filtrante» (*filtering facepiece*), al que acompaña un número que indica el grado de filtrado. Estos respiradores sí están diseñados para filtrar el aire y reducir el número de partículas y gérmenes que inhala el portador.

Por ejemplo, las mascarillas FFP2 y FFP3 filtran, respectivamente, el 94 y el 99 por ciento de las partículas con un diámetro medio de 0,06 micrómetros, al tiempo que presentan fugas totales del exterior al interior (incluidos el filtrado y sellado de las juntas faciales) de menos del 8 y el 2 por ciento del aire inhalado. Esto requiere que se ajusten bien a la cara, lo que suele conseguirse con dos gomas elásticas alrededor de la cabeza y un clip en la nariz.

Con todo, dado que para lograr un filtrado eficiente las mascarillas deben ser gruesas y ajustadas, ofrecen resistencia al paso del aire. Esta se mide evaluando la sobrepresión necesaria para asegurar el flujo, la cual es del orden de 2 milibares para una FFP2 con respiración precipitada. Esto puede parecer poco, pero resulta del mismo orden de magnitud que las variaciones de presión que tienen lugar en los pulmones. Por otro lado, el uso prolongado de mascarillas en situaciones de estrés puede provocar dolores de cabeza. Por ello, algunas se encuentran equipadas con válvulas que facilitan la exhalación.

PARA SABER MÁS

Lessons learnt over 30 years of air filtration in the nuclear industry. J. Vendel et al. en *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 170, art. 012026, 2009.

Modes of transmission of virus causing COVID-19: Implications for IPC precaution recommendations. Organización Mundial de la Salud, 29 de marzo de 2020. Disponible en **www.who.int/publications-detail/modes-of-transmission-of-virus-causing-covid-19-implications-for-ipc-precaution-recommendations**



José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el Departamento de Física Teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.

HISTORIA DE LA CIENCIA

Henri Poincaré y Felix Klein

Una polémica matemática sobre nombres

José Manuel Sánchez Ron

Jules Henri Poincaré (1854-1912) y Felix Christian Klein (1849-1925) pertenecieron al selecto grupo de los matemáticos más importantes de la segunda mitad del siglo XIX y comienzos del XX. Se ha dicho que el siglo XIX comenzó bajo la sombra de un gigante, Carl Friedrich Gauss, y terminó con el dominio de un genio de magnitud similar, Poincaré. En opinión de Jean Dieudonné, matemático notable, «ambos eran matemáticos universales en el sentido supremo, y ambos realizaron contribuciones importantes a la astronomía y la física matemática. Si los descubrimientos de Poincaré en la teoría de números no son iguales a los de Gauss, sus logros en la teoría de funciones son al menos del mismo nivel, incluso cuando uno tiene en cuenta la teoría de las funciones elípticas y modulares, que deben ser acreditadas a Gauss y que representan su descubrimiento más importante en ese campo, aunque no lo publicó en vida. Si Gauss fue el iniciador de la teoría de las variedades diferenciables, Poincaré desempeñó el mismo papel en la topología algebraica. Finalmente, Poincaré es la figura más importante en la teoría de las ecuaciones diferenciales y el matemático que, después de Newton, efectuó el trabajo más destacado en mecánica celeste».

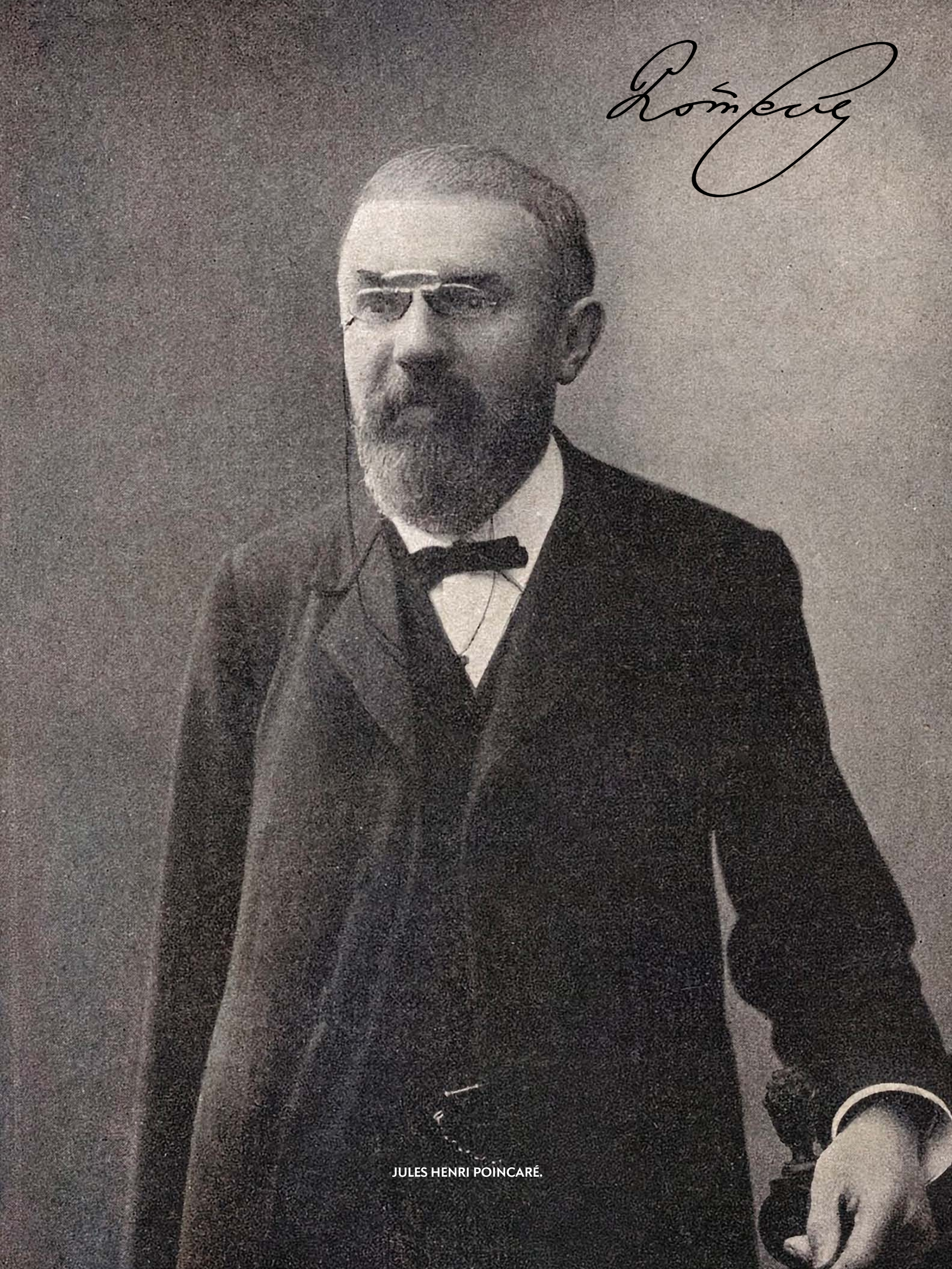
Aunque no tan numerosas y variadas como las de Poincaré, las contribuciones de Klein fueron también importantes. Entre ellas figuran las que produjo en colaboración con el noruego Sophus Lie (1842-1899), con quien se encontró por primera vez en octubre de 1869 durante una reunión de la Asociación Matemática de Berlín. Aunque, al parecer, el encuentro fue fortuito, el 30 de octubre de 1869 Alfred Clebsch respondía desde Gotinga a una carta de Lie en la que le aconsejaba que se pusiera en contacto con Klein: «Ante todo, le recomiendo que vaya a visitar al doctor Klein, que se encuentra actualmente en Berlín (Carstrasse 11), y le presente mis mejores saludos. Encontrará en él a un hombre diligente y afable [...] Se entenderá con él inmediatamente». Clebsh no se equivocaba. Un día después, Klein escribía a su madre informándola de que «entre los jóvenes matemáticos que he conocido, uno me impresiona fuertemente. Se trata de Lie, noruego, cuyo nombre ya conocía de un artículo que publicó en Christiania [hoy Oslo]. En particular, ambos nos hemos ocupado de las mismas cosas, de manera que no faltan temas de los que hablar. Pero no nos une únicamente el mismo amor; también nuestra crítica de la forma en que algunos matemáticos de aquí expresan su importancia a costa del trabajo realizado por otros, especialmente por extranjeros».

Aunque menos conocido que otros grandes matemáticos del siglo XIX, Lie forma parte de ese exclusivo grupo. Destacan sus trabajos sobre la teoría de transformaciones de grupos continuos, que introdujo en varias ramas de la matemática como la geometría o las ecuaciones diferenciales. Conceptos como «grupos de Lie» o «álgebras de Lie» son, desde hace mucho, instrumentos tan familiares como esenciales para el trabajo de matemáticos y físicos teóricos.

Para Klein, la relación que mantuvo con Lie fue muy importante. De hecho, uno de sus resultados más notables, el que presentó en la conferencia que pronunció al tomar posesión en 1872 de una cátedra en la Universidad de Erlangen (de ahí que sea denominado «programa de Erlangen»), encaja perfectamente con el enfoque de transformaciones del matemático noruego. Básicamente, la tesis de ese programa es que existen tantas geometrías como grupos de trasformación; que una geometría se caracteriza por sus invariantes (una perspectiva que le permitió argumentar más tarde que la teoría de la relatividad especial no era sino una geometría lorentziana, y la teoría general de la relatividad, la geometría del grupo de transformaciones generales).

El propio Klein recordó algunos aspectos de las circunstancias en que elaboró las ideas y el texto del programa de Erlangen en el primer tomo de sus obras completas: «Compuse el programa de Erlangen en octubre de 1872. Dos circunstancias son

FUENTE: *DERNIÈRES PENSÉES*. H. POINCARÉ. ERNEST FLAMMARION, PARIS, 1913



JULES HENRI POINCARÉ.

relevantes. La primera, que Lie me visitó durante dos meses, a partir del 1 de septiembre. Mantuve con él, que me acompañó a Erlangen el 1 de octubre, discusiones diarias sobre su nueva teoría de las ecuaciones en derivadas parciales de primer orden (editadas por mí y publicadas en el *Gött. Nachr.* del 30 de octubre). La segunda, que Lie participó enérgicamente en mi idea de clasificar los diferentes enfoques de la geometría en una base teórica de grupos».

Klein versus Poincaré

En 1875, Klein abandonó Erlangen por una cátedra en la Escuela Técnica de Múnich, donde permaneció cinco años. En 1880, en efecto, pasó a ocupar una nueva cátedra, esta vez en Leipzig, que dejó en 1886 por otra en Gotinga, entonces el centro matemático más importante del mundo. Los años en Múnich y los primeros en Leipzig fueron los mejores de su actividad matemática. Además de continuar trabajando en geometría, se dedicó con intensidad a la teoría de funciones de variable compleja, desarrollando la teoría de un tipo especial de funciones, denominadas automorfas. En este campo se encontró con un joven matemático francés, Henri Poincaré, que se había introducido en estos problemas estudiando algunos trabajos de Lazarus Fuchs en ecuaciones diferenciales. Poincaré se había ocupado de casos particulares de las funciones automorfas, pero las generalizaciones que introdujo revelaron la existencia de funciones hasta entonces desconocidas, como las zeta-fuchsianas, que, además, podían ser utilizadas, como demostró él mismo, para resolver las ecuaciones diferenciales lineales de segundo orden con coeficientes algebraicos.

La primera publicación de Poincaré en este campo fue un artículo que envió a las *Comptes rendus* de la Academia de Ciencias francesa el 15 de febrero de 1881. «En el trabajo que tengo el honor de presentar a la Academia», escribía, «me propongo investigar si existen funciones analíticas análogas a las funciones elípticas que permiten integrar varias ecuaciones diferenciales lineales con coeficientes constantes. He llegado a demostrar que existe una clase muy amplia de funciones que satisfacen estas condiciones, y a las que he dado el nombre de funciones fuchsianas, en honor al señor Fuchs, cuyos trabajos me han sido muy útiles en estas investigaciones».

El 12 de junio de 1881, Klein se enteró de los trabajos de Poincaré y le escribió informándole de sus propias investigaciones. Poincaré incluyó en su siguiente artículo un comentario sobre aquella carta, pero señaló que había añadido una condición que Klein no había enunciado, «pero que sin duda no se le había escapado», planteándose —y logrando ya en aquella publicación— generalizar los resultados del alemán. En reconocimiento a la contribución de este, llamó a un tipo de las funciones que utilizaba «funciones kleinianas, puesto que es el señor Klein quien las introdujo». Y fue más allá: tituló su siguiente artículo «Sobre los grupos kleinianos». «Un comentario del señor Klein», escribió allí, «que he citado en mi última nota, me ha llevado a investigar todos los grupos discontinuos formados por las sustituciones de la forma (t, $[\alpha t + \beta]/[\gamma t + \delta]$) (sin condición relativa a un círculo fundamental), grupos que propongo denominar kleinianos».

Polémica por nombres

Aunque reconoció el valor de las investigaciones de Poincaré, Klein no aceptó la terminología introducida por el matemático galo. En este sentido, añadió al final del artículo de Poincaré «Sur les fonctions uniformes qui se reproduisent par des substitutions linéaires» (cuya publicación en *Mathematische Annalen* gestionó Klein) una nota en la que rechazaba que Fuchs mereciera semejante honor y afirmaba que este no había publicado nada sobre ese tema. Enterado Fuchs, escribió indignado a Poincaré el 4 de marzo (1882), informándole de que había preparado un comentario (que publicó en *Nachrichten*) en respuesta a Klein:

En su nota, Klein ha osado hacer una manifestación que repugna a la verdad. Dice que no he publicado en ningún lugar una memoria sobre las funciones que se reproducen por transformaciones lineales. Es porque creo un deber a la dignidad de la ciencia, y también a usted, que debo testimoniar públicamente que la afirmación del Sr. Klein no es cierta.

El 3 de agosto, el influyente matemático sueco Gösta Mittag-Leffler (1846-1927) se unía a la polémica. En una carta dirigida a otro de los grandes de la matemática de entonces, Charles Hermite, manifestaba:

Weierstrass encuentra que Poincaré tiene toda la razón. Lo único que no parece aprobar es el nombre de «funciones kleinianas» [...] Poincaré lo había introducido debido a una carta de Klein donde este le comunicaba ciertas cosas. Pero estas no eran de Klein. Eran de Schottky, lo que Klein olvidó mencionar. Sé de esta historia por el mismo Klein.

Poincaré contestó a la nota de Klein mediante una carta que publicó también en *Mathematische Annalen*, explicando sus razones para hablar de «funciones fuchsianas», en honor de Fuchs, y «kleinianas», por Klein, y no honrar de forma parecida las contribuciones anteriores de, respectivamente, Hermann Schwarz y Friedrich Schottky.

Mittag-Leffler, Poincaré y la creación de *Acta Mathematica*

Inmersos todavía en aquella polémica, el 29 de marzo de 1882 Mittag-Leffler escribió una larga carta a Poincaré, en la que tocaba varios puntos, entre ellos la aparición de una nueva revista:

Mi querido amigo:

Tengo que agradecerle sus dos cartas y el envío de su memoria en los Mathematische Annalen*. La he ojeado, pero sin tener tiempo de estudiarla a fondo. No necesito decirle que tengo la más alta admiración por su genio y la belleza de los resultados que ha obtenido. No creo que me equivoque si le aseguro que sus descubrimientos podrán compararse a los de Abel y que sus funciones son las más importantes que se han encontrado desde las funciones elípticas. Ciertamente, el señor Klein tiene razón en que ha hecho mal en llamar a sus funciones, funciones fuchsianas o kleinianas. Deben llevar el nombre de funciones de Poincaré. Este es el único nombre justo y razonable. Si alguna vez trabajo en este campo fértil que usted ha abierto al análisis, me ocuparé de introducir*

este nombre en lugar de los que usted ha empleado. Me excuso por adelantado, pero no podría hacer otra cosa. ¿Podría ser tan amable de decirme dónde encontraré las publicaciones de Fuchs y Klein que le han llevado a llamar a sus funciones por el nombre de ellos? Dígame también, se lo ruego, ¿dónde ha publicado el señor Fuchs su último artículo contra el señor Klein? Fuchs me envía en general todo lo que escribe, pero no he recibido nada sobre este tema.

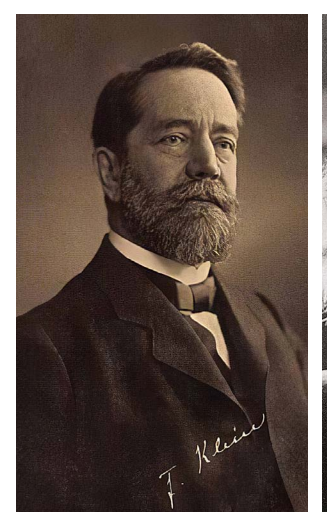
Y ahora tengo una propuesta que hacerle y un ruego que dirigirle. Nosotros, los matemáticos de los países escandinavos, tenemos el proyecto de publicar una nueva revista matemática siguiendo el modelo del Journal de Crelle. *Me han pedido que sea el editor principal. Los otros editores serán Malmsten y Gyldén en Suecia; Broch, Bjerknes, Lie y Sylow en Noruega; Lorenz y Zeuthen en Dinamarca y Lindelöf en Finlandia. La revista se publicará en francés y alemán, pero sobre todo en francés. Le ruego que mantenga esta confidencia estrictamente para usted todavía durante un tiempo. Usted sabe que fue Abel, noruego, quien más hizo por el éxito del* Journal de Crelle. *Ahora el señor Gyldén y yo hemos pensado que usted, francés, podría acaso ser tan generoso como para querer hacer que nuestra revista tenga éxito. ¿Querría usted darnos su memoria «Sur les groupes fuchsiens» para publicarla como la primera memoria de nuestra revista? Se publicaría enseguida y usted recibiría las separatas que quisiera y tan pronto como fuera posible. El primer número de la revista aparecerá a principios del año 1883, pero usted podría distribuir sus separatas cuando deseara. ¿Podría darnos también las cuatro memorias siguientes? Sé perfectamente que mi propuesta es muy pretenciosa, pero piense que los países escandinavos, sobre todo los suecos, son los amigos más cálidos de Francia y de Alemania. No dudo de que en Francia el señor Hermite, en primer lugar, y después los señores Picard y Appell serán colaboradores nuestros. En Alemania, en Italia y en Rusia los mejores autores nos enviarán artículos. Será también un acuerdo entre los editores escandinavos publicar siempre sus mejores trabajos en la revista.*

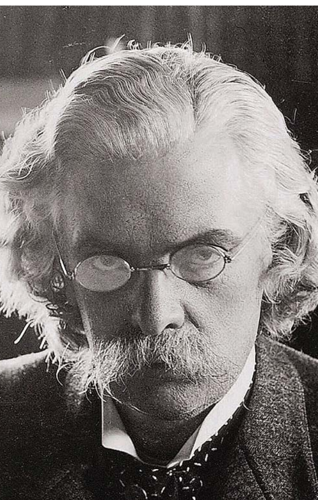
Le ruego que no diga nada a nadie sobre nuestro proyecto, porque su realización depende de usted. Si rechaza, soy de la opinión de que debemos esperar todavía dos o tres años. Es incontestable que nuestra revista hará competencia al journal *de Weierstrass y Kronecker [se refería al* Journal für die reine und angewandte Mathematik*], y esto es algo que no me gustaría mientras Weierstrass esté encabezando la revista. Solo podría hacerme decidir la ventaja enorme de poder publicar sus descubrimientos.*

Poincaré aceptó y fue un artículo suyo, «Théorie des groupes fuchsiens» (de 62 páginas), el que abrió el primer número de la nueva revista, *Acta Mathematica*. Apareció finalmente el mismo año, 1882, de la carta de Mittag-Leffler a Poincaré, y todavía continúa publicándose.

El final de la creatividad matemática de Klein

La última palabra de aquella polémica la tuvo Klein (Poincaré había fallecido ya), que volvió a esta cuestión terminológica en la sección dedicada a las funciones automorfas de su libro de 1926 *Vorlesungen über die Entwicklung der Mathematik im 19. Jahrhundert* («Lecciones sobre el desarrollo de la matemática en el siglo XIX»). Allí escribió: «Cuando Poincaré comenzó, su conocimiento de los trabajos alemanes era muy defectuoso, y denominó a los grupos con círculos-límites, "grupos fuchsianos", un nombre inmerecido. Cuando le informé acerca de las funciones generales, las llamó "funciones kleinianas". Entonces surgió una gran confusión histórica. Finalmente se aceptó mi propuesta en Alemania de omitir todas las referencias personales e introducir el término "funciones automorfas"».





FELIX KLEIN (*izquierda*) y Gösta Mittag-Leffler (*derecha*).

Pero la rivalidad científica que mantuvo con Poincaré, el deseo de llegar a resultados antes que este, terminó siendo fatal para Klein. En el libro mencionado reconoció este hecho:

El precio que tuve que pagar por mi trabajo fue, por lo demás, extraordinariamente alto: a saber, que mi salud se derrumbó completamente. El año siguiente tuve que cogerme repetidamente vacaciones y renunciar a todo trabajo productivo. Hasta el otoño de 1884 no pude seguir adelante, pero nunca más he vuelto a alcanzar el mismo grado de productividad. Más bien me he dedicado a elaborar mis ideas anteriores y luego, ya en Gotinga, a ampliar mi área de trabajo y dedicarme a tareas generales de organización de nuestra ciencia. Así se entiende que en adelante solo haya tocado las funciones automorfas de forma esporádica. Mi actividad propiamente productiva en el ámbito de la matemática teórica se derrumbó en 1882.

Y añadía: «Así, Poincaré encontró campo libre y hasta 1884 continuó publicando en las *Acta Mathematica* sus cinco grandes artículos sobre las nuevas funciones».

PARA SABER MÁS

Oeuvres de Henri Poincaré. Tomo II. Dirigido por G. Darboux. Gauthier-Villars, 1952.
La correspondance entre Henri Poincaré et Gösta Mittag-Leffler. Edición de Philippe Nabonnand. Birkhäuser, 1999.
Archivo de Henry Poincaré **http://henripoincarepapers.univ-nantes.fr**

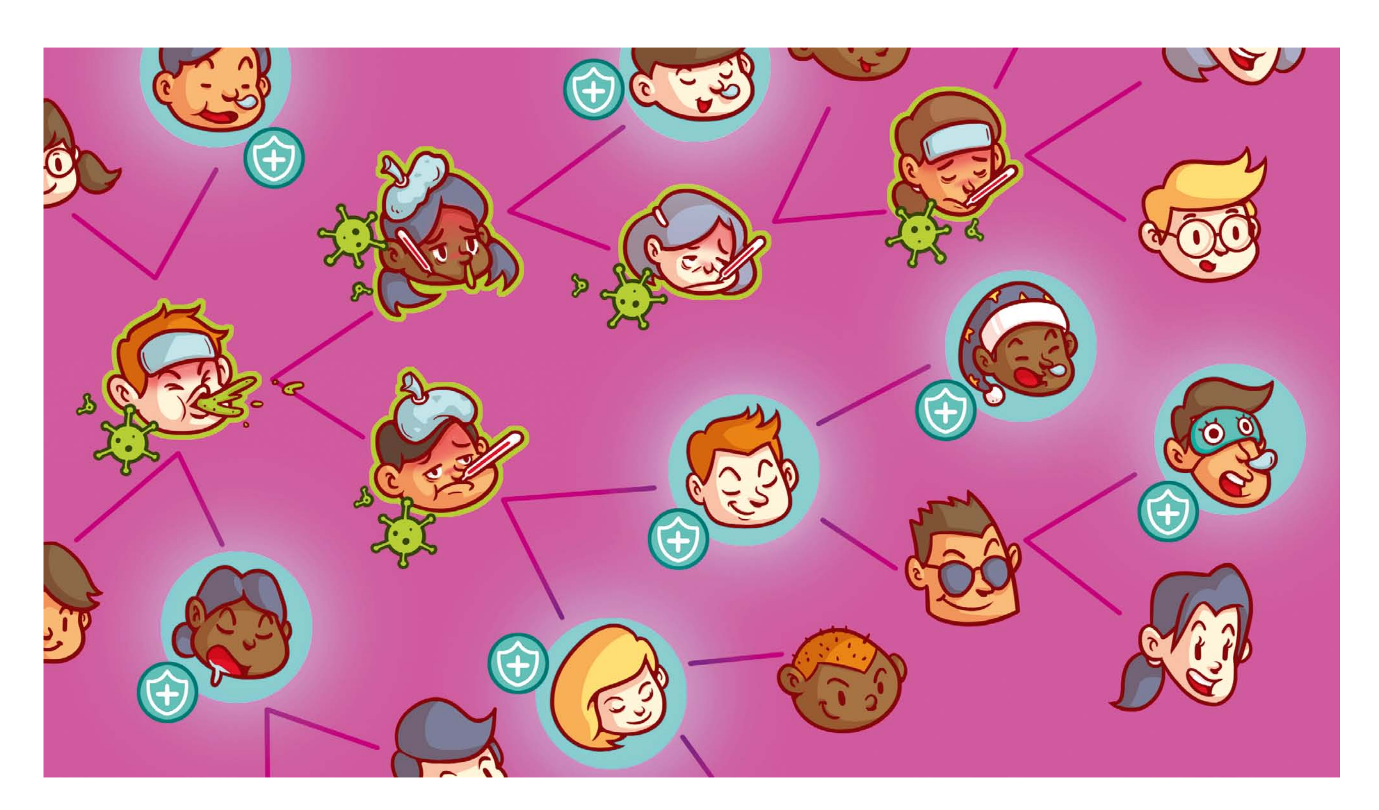
por Patrick Honner



Patrick Honner es profesor de matemáticas y computación en un instituto de secundaria de Brooklyn, Nueva York. Reconocido divulgador, en 2013 recibió el Premio Presidencial a la Excelencia en la Enseñanza de Matemáticas y Ciencias de EE.UU.

Las matemáticas de las epidemias (y de las vacunas)

Un cálculo sencillo muestra cómo la vacunación puede interrumpir la propagación exponencial de una enfermedad y lograr la inmunidad de grupo



BIG MOUTH/QUANTA MAGAZINE

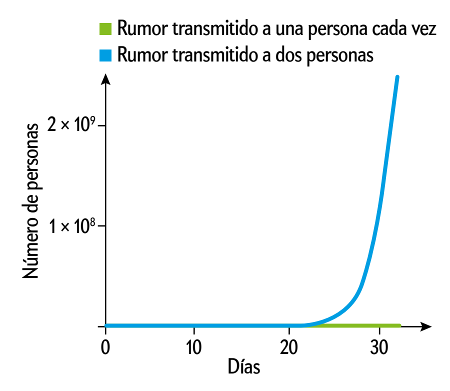
Imagine que oye un rumor tan jugoso que le resulta imposible guardarlo en secreto. Pese a que usted detesta los chismorreos, decide contárselo a un amigo y luego mantener la boca cerrada. No es para tanto, ¿verdad? Si su amigo adopta la misma postura y se lo cuenta solo a otro, el rumor no se difundirá demasiado. Si el proceso se repite cada día, al cabo de un mes se habrán enterado solo 31 personas, incluyéndole a usted.

Así pues, ¿qué mal podría causar decírselo a dos amigos en vez de a uno? Sin embargo, en tal caso las consecuencias serían desastrosas. Si cada individuo se lo cuenta al día siguiente a otros dos, al cabo de un mes el rumor habrá alcanzado a más de un cuarto de la población mundial: 2.147.483.647 personas (o para ser más precisos, $2^{31} - 1$). ¿Cómo puede un cambio en apariencia tan nimio (contarle algo a dos personas en vez de a una) generar una diferencia tan colosal? La respuesta radica en las respectivas tasas de variación.

En el primer caso, el rumor se transmite cada día al mismo número de personas que el día anterior. Eso se cumplirá hoy, mañana, pasado mañana y así sucesivamente, de modo que el número de nuevas personas que cada día se enteran del secreto se mantiene constante. En nuestro ejemplo, dicho número es uno.

Sin embargo, si cada día el rumor se transmite al doble de personas que el día previo, la cantidad de individuos que lo conocen crecerá de manera exponencial: el primer día se enterarán dos personas; el segundo, cuatro; el tercero, ocho, etcétera. El trigésimo día (dejando a un lado algunas objeciones razonables que abordaremos más adelante), el rumor llegará a la friolera de 2^{30} nuevas personas.

¿De dónde surge esa enorme diferencia entre un caso y otro? La respuesta obedece al distinto comportamiento de las funciones lineales y exponenciales. Las primeras se caracterizan por presentar una tasa de variación constante; en este caso, una persona al día. Las funciones exponenciales, en cambio, tienen una tasa de variación cuyo valor se multiplica cada vez: dos personas oyen el rumor, luego cuatro, luego ocho, luego dieciséis, etcéte-



1. ¿CÓMO SE PROPAGA UN RUMOR si cada persona que lo conoce se lo cuenta a otra? ¿Y si se lo cuenta a dos? En el primer caso (*verde*), el crecimiento es lineal, mientras que en el segundo (*azul*) es exponencial. Esto último implica que, pasados unos días, el rumor llegará a más de 2000 millones de personas.

ra. A diferencia de lo que ocurre si la función es lineal, el crecimiento exponencial se acelera; su tasa de variación aumenta cada vez más rápido.

Ahí radica la diferencia entre que al cabo de 30 días el rumor lo conozcan 31 personas o 2000 millones. No es más que una consecuencia de que cada individuo se lo revele a dos personas en vez de a una (*véase la figura 1*).

Número de reproducción

El modelo matemático elemental que acabamos de describir capta la esencia de varios procesos que van mucho más allá de la propagación de rumores. Como cualquier modelo sencillo, pasa por alto o simplifica varios factores que hacen que en el mundo real la situación sea más compleja (como la probabilidad de transmisión de un individuo a otro o el tamaño total de la población, por ejemplo). Sin embargo, constituye un magnífico punto de partida para explorar cómo se diseminan las ideas, cómo crecen las poblaciones y, también, cómo se propagan las enfermedades infecciosas.

Enfermedad	Número básico de reproducción (R_0)
Sarampión	12-18
Viruela	5-7
Paperas	4-7
Gripe (pandemia de 1918)	2-3

FUENTES: CENTRO DE CONTROL DE ENFERMEDADES E INSTITUTOS NACIONALES DE SALUD DE EE.UU. (*tabla*)

Las enfermedades infecciosas se extienden igual que un rumor: alguien contrae el patógeno y lo transmite a otra persona. Existen diferencias, por supuesto, pero el mismo modelo matemático básico sirve para describir ambas situaciones. En nuestro ejemplo inicial, vimos cómo un pequeño cambio en la tasa de transmisión del rumor provocaba un efecto gigantesco en el número de personas que acababan enterándose pasados unos días. Con las enfermedades infecciosas sucede lo mismo: la diferencia entre contagiar a una persona o hacerlo a dos puede significar que nos hallemos ante unos pocos casos aislados o ante una epidemia.

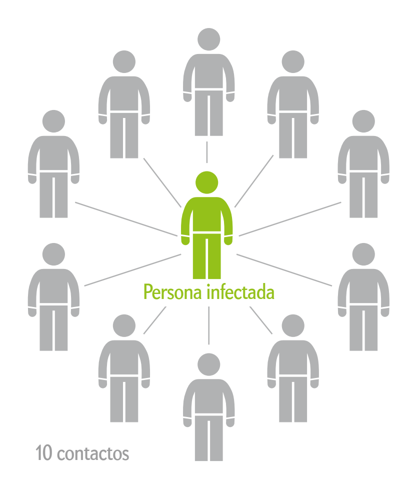
La velocidad de propagación de una enfermedad infecciosa depende de todo un abanico de factores biológicos, ambientales y sociales. No obstante, los epidemiólogos resumen el impacto de todos esos condicionantes en una cantidad: el «número básico de reproducción», denotado R_0. Este representa el valor promedio de nuevos contagios que cabe esperar por cada persona infectada.

En nuestros ejemplos, los números básicos de reproducción eran $R_0 = 1$ (cada sujeto revelaba el secreto a una y solo una persona) y $R_0 = 2$ (cada individuo transmitía el rumor a exactamente dos personas). El «período infeccioso» era de un día. La tabla que adjuntamos aquí muestra algunos números reproductivos básicos de varias enfermedades bien estudiadas.

Nótese que todos los R_0 listados superan la unidad. Esa es, en parte, la razón por la que las enfermedades correspondientes resultan tan peligrosas. Dado que, por término medio, cada persona contagiará a más de una, el número de individuos infectados crecerá de manera exponencial, lo que puede desencadenar un impacto devastador sobre la población. Sin embargo, dado un R_0 que implique un crecimiento exponencial, ¿podemos convertirlo en lineal? En otras palabras, ¿es posible reducir a uno el número de reproducción de una enfermedad?

La importancia de las vacunas

Es aquí donde intervienen las vacunas. Una persona vacunada desarrolla resistencia frente a la enfermedad. Las tasas de éxito varían, pero, para simplificar, supondremos que la vacunación brinda una inmunidad completa frente al patógeno. Esto no solo beneficia de forma directa al individuo vacunado, sino también, de manera indirecta, a toda la población. Si un gran número de personas se vacunan



2. DIAGRAMA DE CONTACTOS de una persona infectada (*verde*). En este ejemplo, dicha persona interacciona con 10 individuos (*gris*) durante el período infeccioso.

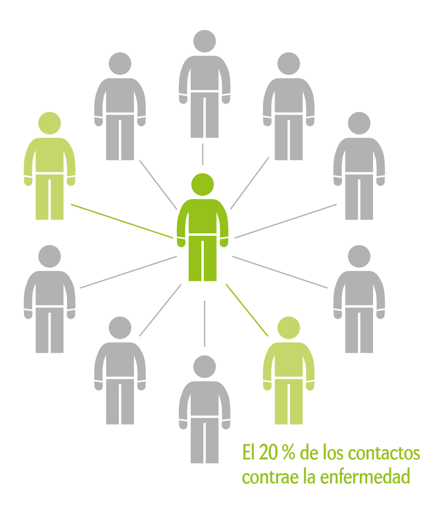
contra una enfermedad, esta no se propagará con tanta rapidez.

En la práctica, la vacunación generalizada reduce el número reproductivo de la enfermedad. Y si se vacuna una cantidad suficiente de personas, dicho número puede decrecer hasta uno, lo que garantizará que la infección se propagará solo de forma lineal. Podemos entonces plantearnos la siguiente pregunta: ¿qué fracción de la población ha de vacunarse para que el número de reproducción de una enfermedad baje hasta uno?

Pensemos con detenimiento qué nos dice realmente el número básico de reproducción. Consideremos una epidemia de gripe con $R_0 = 2$. Eso significa que, por término medio, cada persona infectada contagiará a otras dos. Un solo número, $R_0 = 2$, combina una gran cantidad de información: cuán fácilmente se transmite el virus, la duración del período infeccioso, y la cantidad media de personas con las que un individuo infectado interactuará durante un cierto intervalo de tiempo. Si diseccionamos con detalle dicho número, podremos calcular con facilidad cómo contribuye la vacunación a frenar la enfermedad.

Supongamos que una persona que ha contraído una gripe con $R_0 = 2$ tiene contacto con otras diez mientras puede contagiar la enfermedad. Podemos plasmar dicha situación en un diagrama en cuyo centro situaremos a la persona con gripe y, alrededor, a las otras diez con quien ha interactuado (*véase la figura 2*).

Todas ellas presentan un cierto riesgo de contagiarse. Pero el hecho de que $R_0 = 2$ significa que, de media, solo dos de



3. CONTAGIOS ESPERADOS (*verde*) en el caso de una enfermedad con un número reproductivo de $R_0 = 2$. Si suponemos que cada persona infectada tiene una media de 10 contactos por período infeccioso, podemos estimar la probabilidad individual de contagio en un 20 por ciento.

ellas lo harán (*véase la figura 3*). Así pues, podemos concluir que cada persona tiene una probabilidad del 20 por ciento (2/10) de contraer la enfermedad.

Ahora imaginemos que dos de esas diez personas están vacunadas. Si suponemos que la vacuna confiere una inmunidad completa, la infección no podrá transmitirse a ellas. Por su parte, cada uno de los ocho contactos restantes seguirá teniendo una probabilidad individual de contagiarse del 20 por ciento. De modo que, en promedio, de esas diez personas ahora enfermarán solo $8 \times 0{,}2 = 1{,}6$.

Así pues, si dos de cada diez individuos se vacunan, una persona infectada contagiará de media a otras 1,6. Gracias a la vacunación, el número reproductivo de la enfermedad ha bajado de 2 a 1,6. Entonces, ¿qué hemos de hacer para reducirlo hasta 1 y evitar así el crecimiento exponencial de la enfermedad?

Frenar el crecimiento exponencial

De nuevo, consideraremos que nuestro enfermo inicial entra en contacto con diez personas durante el período infeccioso, y que cada individuo no vacunado presenta un 20 por ciento de probabilidades de contraer el patógeno. Pero ahora supongamos que, de esas diez personas, V están vacunadas. Cabe esperar que, por término medio, se contagien el 20 por ciento de los $10 - V$ individuos no vacunados; es decir, $0{,}2 \times (10 - V)$. Para conseguir un crecimiento lineal y no exponencial, necesitamos que el número promedio de nuevas infecciones sea uno. Por tanto, hemos de resolver la ecuación

$$0{,}2 \times (10 - V) = 1.$$

Una simple manipulación algebraica nos revela que el valor $V = 5$ satisface la ecuación.

Veamos qué sucede cuando cinco de las diez personas con las que interactúa el enfermo están vacunadas (*véase la figura 4*). En la práctica, la vacunación elimina a esos cinco individuos del diagrama de contactos, puesto que ninguno de ellos puede contraer la enfermedad. Por otro lado, cada uno de los cinco sujetos restantes conserva una probabilidad del 20 por ciento de contagiarse, por lo que, en promedio, solo uno de ellos lo hará. De esta manera, al vacunar a la mitad de los individuos, hemos reducido el número reproductivo de 2 a 1.

El proceso puede generalizarse para cualquier número reproductivo básico. Si suponemos que cada individuo infectado entra en contacto con N personas nuevas por período infeccioso, cabe esperar que, en promedio, una fracción R_0/N de ellas enfermará. Pero si, de esas N personas, un número V están vacunadas, entonces el número de nuevas infecciones vendrá dado por la expresión

$$R_0/N(N - V).$$

Y dado que nuestro objetivo es que dicho número sea igual a 1, hemos de resolver la ecuación

$$R_0/N(N - V) = 1.$$

Aquí la verdadera incógnita es V/N, puesto que esta cantidad representa el porcentaje total de individuos vacunados de la población. Así pues, conviene reescribir la expresión anterior como

$$V/N = 1 - 1/R_0.$$



4. EN LA PRÁCTICA, la vacunación elimina a los individuos inmunizados (*azul*) del diagrama de contactos. La probabilidad de contraer la enfermedad entre quienes no lo están se mantiene constante (20 por ciento), por lo que ahora se contagiará solo una persona en lugar de dos.

En otras palabras: si la fracción de individuos vacunados entre la población general asciende a $1 - 1/R_0$, entonces cada persona infectada contagiará solo a otra. Por tanto, $1 - 1/R_0$ es el valor mágico que da como resultado un crecimiento lineal, y no exponencial, de la enfermedad.

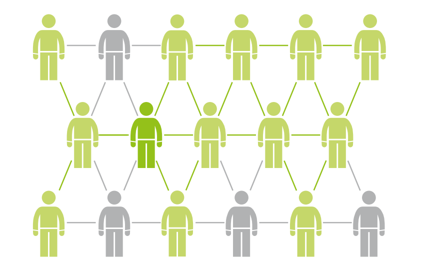
Inmunidad de grupo

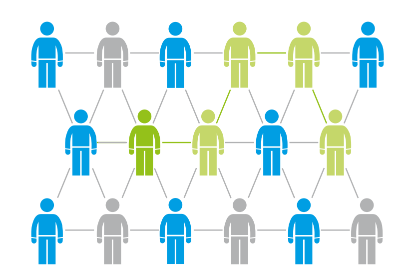
Ese porcentaje de vacunaciones consigue una especie de inmunidad colectiva frente a la enfermedad: no impide que todas y cada una de las personas se contagien, pero sí frena la propagación exponencial. Esta propiedad se conoce como «inmunidad de grupo», y el porcentaje de vacunaciones requerido para lograrla se denomina «umbral de inmunidad colectiva» (*véase la tabla*).

La vacunación no solo supone un beneficio para el individuo vacunado, sino también para toda la población. Cuando se alcanza el umbral de inmunidad colectiva,

Enfermedad	Número básico de reproducción (R_0)	Umbral de inmunidad colectiva* UIC = $1 - 1/R_0$
Sarampión	12	91,7 %
Viruela	5	80 %
Paperas	4	75 %
Gripe (pandemia de 1918)	2	50 %

* Porcentaje de vacunaciones necesario para conseguir la inmunidad de grupo





5. LA VACUNACIÓN GENERALIZADA transforma un diagrama con numerosas vías de propagación (*izquierda*) en uno que reduce drásticamente el número de rutas infecciosas (*derecha*). Ello deriva en una propagación más lenta de la enfermedad y disminuye el riesgo de un brote epidémico.

la enfermedad se transmite a una velocidad lo suficientemente baja para prevenir una posible catástrofe (*véase la figura 5*).

Otra característica clave de la inmunidad de grupo reside en que no solo protege a las personas vacunadas, sino también a quienes no lo están. Dado que disminuye la probabilidad de que la enfermedad se extienda de manera indiscriminada, todos corren un riesgo mucho menor, incluso quienes no están inmunizados. Esto reviste especial importancia para aquellas personas que no pueden vacunarse por motivos médicos.

Aunque aquí hemos supuesto que las vacunas son eficaces al cien por cien, los beneficios de la inmunidad de grupo pueden lograrse aun cuando su eficacia sea inferior. Incluso en tales casos, la vacunación generalizada reduce la cantidad media de contagios por persona infectada, lo que rebaja el número de reproducción efectivo de la enfermedad.

Hemos visto la descomunal diferencia entre un crecimiento lineal y uno exponencial. En lo que atañe a la transmisión de enfermedades, esta distinción puede convertirse en una cuestión de vida o muerte. Las matemáticas que subyacen a la vacunación y a la inmunidad de grupo son importantes. Así que cuénteselo a un amigo. O mejor aún: cuénteselo a dos.

Nota de los editores: En lo que respecta a la actual pandemia de COVID-19, el número básico de reproducción (R_0) no se conoce con exactitud y las estimaciones varían de país a país. Un informe del Imperial College de Londres fechado el 30 de marzo y basado en el análisis de 11 países europeos proporcionaba una horquilla de valores medios para R_0 (al inicio de la epidemia; es decir, anterior a las medidas de control) de entre 2,5 y 5 aproximadamente.

Este artículo apareció originalmente en QuantaMagazine.org, una publicación independiente promovida por la Fundación Simons para potenciar la comprensión pública de la ciencia



Quanta magazine

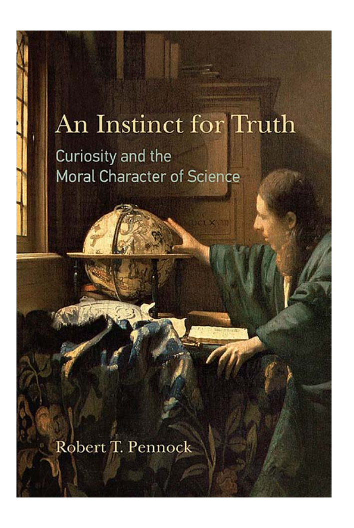
PARA SABER MÁS

Estimating the number of infections and the impact of nonpharmaceutical interventions on COVID-19 in 11 European countries. Equipo de respuesta a la COVID-19 del Imperial College, 30 de marzo de 2020. Disponible en **https://www.imperial.ac.uk/mrc-global-infectious-disease-analysis/covid-19**

EN NUESTRO ARCHIVO

Modelos de propagación de enfermedades. Joan Saldaña en *IyC*, octubre de 2013.

Prever la próxima pandemia. Alessandro Vespignani en *IyC*, julio de 2018.



AN INSTINCT FOR TRUTH
CURIOSITY AND THE MORAL CHARACTER OF SCIENCE
Robert T. Pennock
MIT Press, 2019

Virtudes y vicios de la ciencia

El científico como ser moral y la curiosidad como germen de su carácter

La primitiva filosofía de la ciencia, desde el neopositivismo en adelante, se ocupaba de los productos lingüísticos de la ciencia más que de la actividad científica. Atendía a los conceptos, enunciados y teorías, y estudiaba su semántica y estructura lógica. Concebía la ciencia como lenguaje más que como acción humana. La distinción estándar entre el contexto de justificación —de carácter puramente lógico, se suponía— y el contexto de descubrimiento permitió a los filósofos desentenderse durante décadas de la ciencia como actividad. No obstante, a partir de las obras de autores como Thomas Kuhn o Paul Feyerabend, se inició en la disciplina un giro hacia lo pragmático. Según esta nueva filosofía de la ciencia, incluso la justificación de las teorías hay que buscarla en el plano de la acción humana. Es más, hasta la lógica y el lenguaje habrá que pensarlos como modos de acción humana.

El libro de Robert T. Pennock, filósofo de la Universidad Estatal de Michigan, se inscribe en esta corriente de atención a lo práctico: «Los artículos científicos son signos, indicadores de las pruebas, no pruebas por sí mismos» (pág. 227). Las pruebas (*evidences*) científicas están en el nivel de la acción, las obtienen las personas que hacen ciencia mientras experimentan con la naturaleza. Miremos, pues, hacia la Luna y no hacia el dedo que la señala. Miremos hacia la actividad de las personas que hacen ciencia antes que a los productos lingüísticos de dicha acción.

¿Qué vemos ahora? Según Pennock, vemos personas que persiguen ciertos valores. Uno de ellos, quizás el más importante, es el de la verdad empírica sobre el mundo natural. Al servicio de esta búsqueda, las personas que hacen ciencia desarrollan ciertas «virtudes vocacionales» (pág. xx), las cuales se estructuran en torno a una principal: la virtud de la curiosidad. De hecho, el autor caracteriza la ciencia como una forma de curiosidad sistemática. Pennock —quien no siempre distingue entre valores y virtudes— trata de hacer una reconstrucción racional, no de las teorías científicas, sino de la estructura moral de los científicos, su carácter y sus virtudes profesionales.

En torno a la virtud de la curiosidad (capítulos 1 y 2), que según el autor tiene un arraigo biológico y evolutivo, se estructura el carácter moral de la persona que hace ciencia. Y en conexión con la curiosidad van apareciendo otras virtudes cruciales para ella. Por ejemplo, la actitud escéptica y el aprecio de la objetividad (capítulo 3) acaban institucionalizándose en la comunidad científica. La atención (*attentiveness*), en todos sus sentidos, incluidos los que tienen implicaciones emocionales (*emotion of the intellect*), forma también parte del juego de virtudes imprescindibles para hacer ciencia (capítulo 4). Asimismo, la disciplina es requisito para la investigación científica y, en conexión con ella, la meticulosidad, la paciencia y la perseverancia (capítulo 5), no menos que la humildad ante el dato empírico y el coraje intelectual (capítulo 6).

> Pennock propone una determinada filosofía de la ciencia, y lo hace para usarla como arma contra el relativismo posmoderno, la moda de la posverdad o el dogmatismo creacionista

Para lograr su finalidad, es decir para edificar una *virtue philosophy of science* (pág. xv), Pennock se apoya en la teoría de las virtudes, de raíz aristotélica y que ha conocido una llamativa revitalización en las últimas décadas, tanto en el terreno ético como en el epistémico, con autores como Martha Nussbaum o Alasdair MacIntyre. También apela con insistencia al evolucionismo darwinista como explicación de las bases biológicas que permiten el desarrollo y asentamiento de los hábitos virtuosos. Se vale, además, de una metodología mixta, que incluye la tradicional reconstrucción racional mezclada con estudios de campo que aportan entrevistas a científicos. A través de ellas se evalúa la importancia relativa que estos conceden a determinados valores y virtudes, y se identifica el tipo de carácter que estiman idóneo para la práctica de la ciencia. No se ve, sin embargo, cómo estos datos sociológicos pueden contribuir a la intención normativa que el libro reconoce. Tampoco queda claro si las distintas fuentes de inspiración, desde Aristóteles a Darwin (¿y de vuelta?), pueden hacerse compatibles entre sí. En todo caso, el mero intento ya resulta inspirador y seguramente provechoso para el lector.

El libro de Pennock contiene también una intención abiertamente polémica y no solo propositiva. Propone una determinada filosofía de la ciencia, y lo hace para usarla como arma contra algunas de sus bestias negras: el relativismo posmoderno, la moda de la posverdad, el dogmatismo de los creacionistas... y finalmente el propio presidente Donald Trump, del cual el autor no parece ser muy partidario. Todo ello se ciñe a la coyuntura cultural y política estadounidense, a costa, eso sí, de una cierta pérdida de universalidad filosófica y de perdurabilidad del texto.

Mirando ya por encima de lo coyuntural, es quizás ingenuo creer que las virtudes vocacionales del científico, su deontología profesional, por así decirlo, puedan sanarnos a un tiempo del relativismo y del dogmatismo, como si la propia ciencia no cayese a veces en lo uno o en lo otro. Pennock resuelve la cuestión atribuyendo los males de la ciencia a la falta de virtud, a las prácticas viciadas que a veces se dan hasta en ella. También hay vicios cientí-

ficos (capítulo 8), como la arrogancia, la indiferencia o la gula (*gluttony*) intelectual. Y es que hasta la virtud central de la curiosidad puede ser llevada al exceso. Superadas estas desviaciones indeseables, las virtudes propias de la vocación científica permitirán, en opinión de Pennock, establecer un diálogo fructífero entre la ciencia y la religión, siempre que esta no sea dogmática, así como entre la ciencia y las artes, siempre que estas esquiven el relativismo posmoderno (capítulo 7).

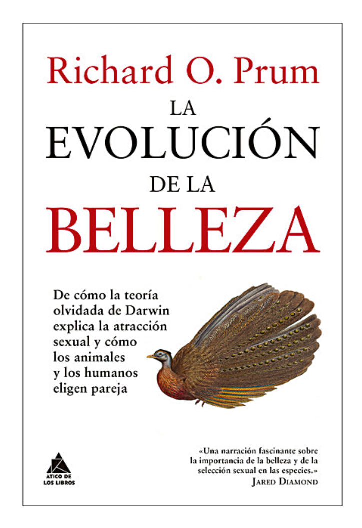
Con la búsqueda de un diálogo entre la ciencia y otros ámbitos de la vida humana, Pennock parece ponerse a salvo del cientificismo. Aunque quizá no lo logra del todo, ya que atribuye a la ciencia objetivos inequívocamente epistémicos. La pone al servicio de la verdad, mientras que la religión, las artes —incluida la literatura—, las humanidades en general o la filosofía responderían a objetivos no epistémicos. Como muestra, resulta muy significativo que Pennock asocie la ciencia a la curiosidad, y el arte, en cambio, a la creatividad. Con ello deja de reconocer los aspectos epistémicos del arte y los aspectos creativos de la ciencia, así como la peculiar posición de lo tecnológico. O mejor dicho, lo hace en algunos pasajes, pero siempre muy tímidamente, manteniéndose en los márgenes borrosos de un tibio cientificismo.

Lo mismo puede decirse en lo que respecta a la relación entre las virtudes científicas y las propias de toda persona en cuanto tal. Cuando reconoce que hasta la curiosidad científica puede ser llevada al exceso, debería mencionar a renglón seguido que solo la prudencia común identifica el justo medio. Pero la virtud de la prudencia tiene, en la economía de Pennock, un papel secundario, mientras que para Aristóteles ejercería como armonizadora de todas las demás virtudes, para evitar excesos y para eludir el fútil virtuosismo (es decir, la búsqueda de la virtud por la virtud misma).

Cierto es que el autor dedica el capítulo 9 a recordarnos que primero somos seres humanos y solo en segundo lugar científicos (quienes lo sean). La ciencia, aunque tenga sus propios fines, ha de ponerse al servicio de objetivos más amplios y primordiales; al servicio de las personas, del florecimiento humano. Esta tesis de Pennock no es cientificista, claro está. Pero la sensación de ambigüedad nunca acaba de desaparecer, pues el autor no decide si es el sentido común, la sensatez o la prudencia propia de toda persona lo que debe modular las virtudes vocacionales del científico, o si son estas las que han de reeducar a la humanidad.

En suma, se trata de un libro de muy alto interés para científicos y para filósofos. El autor maneja con maestría un amplio registro de recursos expositivos, con lo que consigue que el texto se lea con agrado. Concilia la filosofía de la ciencia con la teoría de las virtudes, y coloca la cuestión de la racionalidad científica en el terreno de lo práctico, lo cual resulta especialmente original en el ámbito anglosajón, aunque no tanto en el iberoamericano, donde se viene hablando de filosofía práctica de la ciencia desde hace al menos un par de décadas.

—Alfredo Marcos
Universidad de Valladolid



LA EVOLUCIÓN DE LA BELLEZA
DE CÓMO LA TEORÍA OLVIDADA DE DARWIN EXPLICA LA ATRACCIÓN SEXUAL Y CÓMO LOS ANIMALES Y LOS HUMANOS ELIGEN PAREJA
Richard O. Prum
Ático de los Libros, 2019

La belleza que simplemente sucede

Una defensa de la evolución de la belleza como algo independiente de la selección natural

Richard Prum, profesor de la Universidad Yale y avezado y prestigioso ornitólogo y biólogo evolutivo, propone en este libro reivindicar la tesis inicial de Darwin sobre la evolución de las preferencias de pareja y los ornamentos. El libro gira sobre la selección de pareja basada en la apreciación de caracteres estéticos, y el objetivo final es entender el porqué, así como las consecuencias, de la existencia de la belleza en la naturaleza.

No es este un tema trivial, puesto que, si no existiera la selección sexual, el mundo sería un lugar muy distinto del que conocemos —además de monótono y aburrido, casi como en blanco y negro—. Para verlo, basta con que nos preguntemos cómo seríamos nosotros, física y socialmente, si no existieran las preferencias de pareja y si no hubiera cierta libertad en la elección de compañeros sexuales y reproductivos.

Prum agita el sentir general de la disciplina. Muchos biólogos evolutivos sostienen que los caracteres de selección sexual (aquellos que tienen una función relacionada con la atracción y consecución de parejas sexuales, como la cola de un pavo real, el contraste entre cintura y cadera en los humanos, el despliegue nupcial en las grullas o los pechos aparentes y no sujetos a estacionalidad en las mujeres) son caracteres que indican calidad genética, fertilidad o capacidad de supervivencia. Según esta perspectiva, la selección sexual es, digamos, una sucursal de la selección natural. Prum, sin embargo, defiende que la belleza existe y evoluciona simplemente porque es agradable para el observador y porque existe sobre ella una preferencia completamente arbitraria y no basada en una utilidad indicadora de calidad genética o salud.

Esta hipótesis no es nueva, y de hecho Prum nos recuerda que fue el propio Darwin (no en *On the origin of species*, sino unos años después en *The descent of man, and selection in relation to sex*) quien originalmente concibió la evolución de la belleza de esta manera, como algo independiente de la selección natural. Prum argumenta que esta visión de la

belleza ha sido olvidada en pro de una visión más utilitaria y adaptativa, y aporta en su libro toneladas de información y elementos nuevos, además de una gran dosis de convicción personal, en defensa de su hipótesis sobre el origen y evolución de la belleza.

El tema tratado resultará de interés para naturalistas, apasionados de las aves y el público general. Es también una lectura oportuna para entender los roles de género y las interacciones sexuales, incluido el comportamiento de machos y hembras con relación a la elección de pareja. Está claro que Prum sabe de lo que habla, tras varias décadas dedicándose al estudio de la selección sexual. El libro destila la pasión obsesiva del autor por el estudio de las aves, el cual le ha llevado en última instancia a pasar gran parte de su vida preguntándose sobre la razón de ser de la belleza. La prosa es cercana y asequible, y gran parte del libro se lee como las memorias de este naturalista y científico notable.

Prum emerge como un divulgador eficaz, y prueba de ello es que el libro ha recibido varios premios de gran importancia e incluso ha sido finalista del premio Pulitzer. La pasión del autor por la gran diversidad y el esplendor del comportamiento aviar puede resultar contagiosa, y en especial los amantes de las aves apreciarán la profusión de detalles en algunos pasajes. Sin embargo, otros lectores encontrarán arduos algunos capítulos en los que se abusa ligeramente de las descripciones conductuales de algunas de las especies que el autor ha usado como modelos de estudio. Lo anterior se ve compensado, no obstante, con la multitud de aspectos interesantes que el lector descubrirá acerca de las implicaciones del lema «la belleza que simplemente sucede» y el potencial de cambio que «el gusto por la belleza» trae consigo.

Es justamente en la discusión de estas implicaciones donde el libro destaca. La obra hace apuntes reveladores —a veces basados en hechos, a veces especulativos— sobre el conflicto sexual y sobre el poder y la importancia de la autonomía sexual femenina. Habla sobre la sexualidad humana, la evolución del orgasmo femenino, la agresividad masculina, la inteligencia social de los humanos, y de cómo la selección sexual estética a través de la elección de pareja por parte de las mujeres, y no la selección natural, ha podido ser en gran medida responsable de todos esos rasgos.

También habla de arte biótico, de feminismo y de la manera en que la elección de pareja y la autonomía sexual femeninas pueden explicar el cuidado paterno e incluso la homosexualidad. Habla del papel de la selección estética en la cultura y de cómo la cultura constituye un vehículo a través del cual se han producido carreras armamentísticas entre machos y hembras derivadas del conflicto sexual, donde a veces los sexos se han armado, atacado y resistido (pensemos, por ejemplo, en los cambios sociales en cuanto al uso de anticonceptivos, el aborto o los derechos de las mujeres).

Con sus provocadoras ideas acerca del funcionamiento de la selección estética en la evolución humana, el libro de Prum no dejará indiferente a nadie. En contra del enfoque de la psicología evolutiva tradicional, la cual entiende los rasgos atractivos como indicadores de calidad, la teoría estética de Prum sostiene que la sexualidad y la belleza humanas se han modelado gracias a la búsqueda de placer de las mujeres, y que por tanto ese placer y las preferencias estéticas son en sí mismas una piedra angular del cambio evolutivo.

Personalmente, considero que Prum a veces crea un hombre de paja al proponer que la biología evolutiva de nuestros días únicamente defiende la visión adaptativa de la belleza. Esto no es así desde que sabemos, desde hace ya algún tiempo, que el conflicto entre sexos es un fenómeno común en especies con reproducción sexual. En algunas ocasiones, el autor además se deja llevar demasiado lejos por su convicción personal de que su teoría estética explica casi todos los temas tratados en el libro. Sin embargo, después de todo, en lo relativo a muchas de las proposiciones más controvertidas, Prum no está falsando hipótesis, sino sugiriendo nuevas formas de ver la vida.

Hay trabajo de sobra para que otros intenten contrastar, siguiendo el método científico, las ideas propuestas. Más allá de si Prum está en lo cierto —y mi opinión es que una veces lo está y otras no—, el libro rezuma pasión e independencia de pensamiento y resulta altamente instructivo para entender el potencial absolutamente transformador de la belleza y de la selección basada en atributos estéticos. Y por ende, para comprendernos a nosotros mismos como animales sexuales que somos.

—Francisco García González
Estación Biológica de Doñana (CSIC)

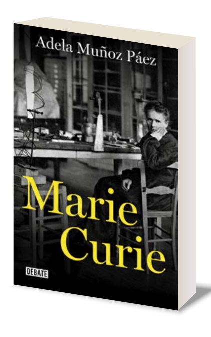
NOVEDADES

Una selección de los editores de *Investigación y Ciencia*



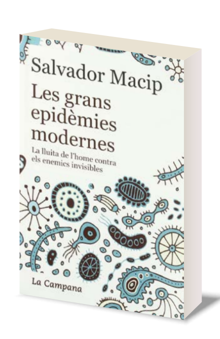
14 MANERAS DE DESTRUIR LA HUMANIDAD

Daniel Arbós y Màrius Belles
Next Door Publishers, 2020
ISBN: 978-84-120685-5-9
224 págs. (18 €)



MARIE CURIE

Adela Muñoz Páez
Debate, 2020
ISBN: 9788417636807
336 págs. (19,90 €)

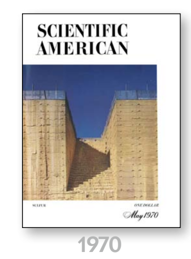


LES GRANS EPIDÈMIES MODERNES
LA LLUITA DE L'HOME CONTRA ELS ENEMICS INVISIBLES

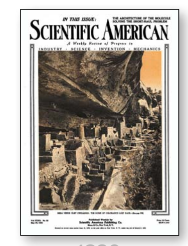
Edición actualizada
Salvador Macip
La Campana, 2020
ISBN: 9788416863983
280 págs. (17,90 €)

Recopilación de Daniel C. Schlenoff

MAYO



1970



1920

1870

1970

Vuelve la guerra del mono

«En California se ha reanudado una vez más la clásica polémica sobre la evolución. En unas nuevas directrices elaboradas por una comisión de profesores de ciencias, el Consejo Estatal de Educación introdujo la afirmación de que "las pruebas científicas relativas al origen de la vida conllevan al menos una dualidad o la necesidad de considerar varias teorías". Cabe presumir que ello requerirá enseñar, a la par que el darwinismo, teorías tan antagónicas como son la del relato del Génesis y la aristotélica de la generación espontánea. Esta decisión podría afectar a la enseñanza de la biología en todo el país, pues en California se venden aproximadamente el 10 por ciento de todos los libros de texto, y no es probable que las editoriales renuncien al mercado californiano ni que editen versiones especiales a la medida de los requisitos de un estado.»

1920

Un caballo aerotransportado

«De Santa Bárbara (California) nos informan de que un caballo presentado en una exposición celebrada en aquella ciudad llegó en avión desde Los Ángeles. El viaje se retrasó un día, hasta que representantes de la Sociedad Protectora de Animales quedaron plenamente convencidos de que el viaje no implicaba crueldad alguna.»

Un túnel bajo el río

«Las huelgas de diversos tipos han acentuado el aislamiento físico de la ciudad de Nueva York y han hecho imperativo que la isla de Manhattan disponga de unos enlaces para el tránsito que permitan una circulación de vehículos ininterrumpida entre las márgenes de Nueva Jersey y de Nueva York del río Hudson. No debe extrañar en los círculos técnicos que el ingeniero jefe, Clifford M. Holland, y su equipo de expertos hayan optado por túneles dobles de fundición y la tunelación con escudo. Este método de excavación horizontal ya se ha empleado, hasta ahora, en veintidós túneles ferroviarios bajo los ríos Hudson y Este.»

El Túnel de Holland se inauguró en 1927.

1870

Comercio de animales vivos

«Según una revista inglesa, "el tráfico de animales silvestres es una actividad tan regular como el comercio de té, café o algodón. Algunos de esos ejemplares, entre los que destacan, por su número, los loros, son traídos por los marineros, acaso como pretendidos regalos para sus novias, pero los venden por grog o tabaco en cuanto desembarcan. Si a un caballero o a una dama le agradara un elefante para montarlo en privado, un tigre que adorne su jardín, un cocodrilo o un hipopótamo para el lago, o un avestruz para el césped, su deseo puede verse cumplido sin más que dirigir una carta al agente de Londres".»

Preparando alimentos en casa

«Nuestro grabado muestra un simple e ingenioso útil para extraer los huesos de cerezas, ciruelas y similares, y también las pepitas de pasas, arándanos, etcétera. La forma perfeccionada del utensilio fue patentada por George Geer, de Galesburg (Illinois).»

Contaminación

«Tal como nuestros lectores saben bien, nuestra postura en pro del pozo negro para sustituir al retrete de agua corriente es del todo rotunda y se basa en consideraciones tanto sanitarias como económicas. Nos parece, empero, que la opinión pública no ha captado la enorme importancia de este asunto, que no logra ser valorada salvo por quienes conceden una atención especial al problema del tratamiento de las aguas negras. En las revistas científicas se discute la cuestión con toda su relevancia, y se proponen no pocos planes, algunos máximamente inviables. Pero la prensa popular del país se ha contentado con orillar el tema, tras abordarlo brevemente, y dejar para cualquiera la solución que el destino le tenga reservado. En nuestra opinión, no hay hoy cuestión que revista más importancia que la interrupción de la enorme descarga de materia fertilizante que se vierte al mar, así como la purificación de las aguas que rodean las grandes ciudades y de la atmósfera que las cubre.»



1870: Deshuese de cerezas en casa con el más reciente útil simplificador del trabajo.

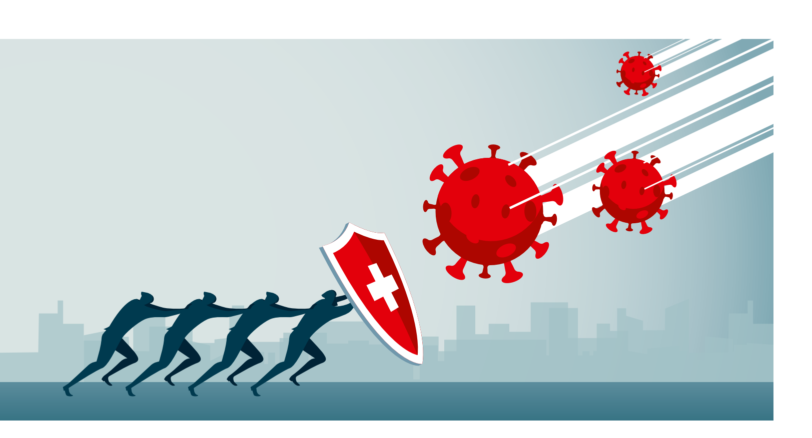
SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. XXII, N.° 20 [NUEVA SERIE], 14 DE MAYO DE 1870

INFORME ESPECIAL

NUEVOS AVANCES EN LA LUCHA CONTRA LA COVID-19

VV.AA.

Los científicos centran sus esfuerzos en combatir la pandemia del nuevo coronavirus.





MEDIOAMBIENTE

El cambio climático en el Mediterráneo

Roberto Danovaro

Las alteraciones fisicoquímicas, biológicas y ecológicas que están sufriendo los océanos no siguen una distribución homogénea, sino que se concentran en algunas regiones, entre ellas nuestro mar.

MATEMÁTICAS

El problema de los tres cuerpos

Richard Montgomery

Aunque los matemáticos saben que nunca podrán resolver completamente este problema centenario, han realizado algunos descubrimientos fascinantes abordando pequeñas partes del mismo.



ARQUEOLOGÍA

La primera historia

Kate Wong

Las pinturas rupestres de una cueva en Sulawesi son la prueba de arte narrativo más antigua descubierta hasta la fecha.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA EDITORIAL
Laia Torres Casas
EDICIONES
Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz
DIRECTOR DE MÁRQUETIN Y VENTAS
Antoni Jiménez Arnay
DESARROLLO DIGITAL
Marta Pulido Salgado
PRODUCCIÓN
M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA
Eva Rodríguez Veiga
ADMINISTRACIÓN
Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES
Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

ACTING EDITOR IN CHIEF Curtis Brainard
PRESIDENT Dean Sanderson
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Polvoranca - Trigo, 39 - Edificio B
28914 Leganés (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD

Prensa Científica, S. A.
Teléfono 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

ATENCIÓN AL CLIENTE

Teléfono 935 952 368
contacto@investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes* y *¿Qué está matando a la mariposa monarca?*; José Óscar Hernández Sendín: *Apuntes* y *Las matemáticas de las epidemias (y de las vacunas)*; Fabio Teixidó: *Apuntes* y *Los sinuosos afluentes del Amazonas*; Ernesto Lozano: *El enigma de las infecciones asintomáticas de COVID-19* y *¿Cómo funcionan las mascarillas de protección respiratoria?*; Miguel A. Vázquez Mozo: *La crisis en torno a la constante de Hubble* y *El enigma de la sustentación aerodinámica*; Gonzalo Claros: *Promesas y riesgos del impulso génico*; Ana Mozo García: *El método genético que está revolucionando la epidemiología*; Juan Pedro Campos: *Cómo evitar una nueva pandemia*; Alfredo Marcos: *La filosofía científica de Mario Bunge*; Bartolo Luque: *Demostrar la hipótesis del continuo*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotimpres - Pla de l'Estany s/n - Pol. Ind. Casa Nova 17181 Aiguaviva (Girona)

Printed in Spain - Impreso en España